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

正会員 大久保 和明 (大塚電子(株)) 正会員 大澤 祥宏 (大塚電子(株))

Effect to SRDF of Integrating Sphere in BRDF of Integrating Sphere inside of Wall Reflective Material

Member **Kazuaki Ohkubo** (Otsuka Electronics Co.,Ltd.) and Member **Yoshihiro Osawa** (Otsuka Electronics Co., Ltd.)

ABSTRACT

An integrating sphere is commonly used for a total luminous flux measurement of LED lighting. According to the theory of the integrating sphere, its interior coating needs to be a perfect reflecting diffuser. Although JIS C7801-2009 and IES-LM79, in which the measurement method of the total luminous flux of a light source is standardized, recommend that the reflectance of an interior coating of an integrating sphere be 90 % or higher, its deviation from the Lambertian is not discussed. This report measures and compares the bidirectional reflectance distribution functions (BRDF) of two commercial BaSO₄ coatings, made by different manufacturers, and a PTFE coating for the integrating sphere. All samples had characteristics similar to the perfect diffuse reflection if the angle of incidence was close to the normal of the surface. At an incident angle of 60 degrees or more, BRDF of some of the sample was grater out-of-perfect diffusion. It affects the spatial response distribution function (SRDF) of the integrating sphere when a 2 π geometry light source mounted on the sphere wall is tested and when part of the light from the source is reflected on the sphere wall closest to the source.

KEYWORDS : integrating sphere, total luminous flux, reflectance, BRDF, radiance, SRDF

1. まえがき

LED 光源照明の全光束評価は、そのエネルギー効率評価として重要な測定である。これらの測定には主として積分球が使用されているが、積分球の原理¹⁾から光源や遮光板が大きさを持たない場合、半径 r の積分球中心から、積分球壁面に光束 Φ が照射されたとき、積分球壁面の照度 E は、積分球壁面の場所のいかんにかかわらず次式で示す一定の値となる。このとき、積分球壁面は、反射率 ρ で完全拡散することが前提となる。

$$E = \frac{\Phi}{4\pi \cdot r^2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} \quad \cdots \cdots (1)$$

この積分球壁面に、受光角特性が余弦則と完全に一致する受光器を設けて、積分球壁面の照度を測定する。積分球内壁の鉛直角 θ 、水平角 ϕ に前述の光束 Φ を照射した場合、受光器の出力 $R(\theta, \phi)$ で得られる空間応答度分布関数 SRDF (Spatial Response Distribution Function)²⁾³⁾ は、一定となることが望ましい。これは、積分球を用いた光源の全光束測定は、標準電球と試料光源との比較測定であるため、積分球の SRDF が一定でない場合、標準電球と試料光源の配光の違いによる測定のズレが生ずるためである。実際の積分球は、測定する光源に大きさがあることや、積分球内部の遮光板などの構造物の影響を受けるため SRDF は分布を持つが、先に述べた積分球の壁面の二方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Functions) の完全拡散特性からの外れや、受光器の入射角特性の余弦則からの外れが影響する。筆者らは先に、受光器の入射角特性の余弦則からの外れに対する検討結果を報告した⁴⁾。

一方、積分球壁面の反射特性に関しては、光源の全光束測定方法を規定する JIS C 7801-2009⁵⁾、や JIS C 8152-1-2012⁶⁾、JIS C 8152-2-2012⁷⁾、IES-LM79⁸⁾ などでは、積分球壁面の反射率が 90 % 以上の拡散反射特性を持つことを推奨しているが、それらの配光特性についての記載はない。また、完全拡散反射を要求される標準反射板の二方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Functions) の評価は成されているが⁹⁾⁻¹¹⁾、

図1 反射材料の反射角特性測定光学系

Fig.1 Schematic diagram of the optical measurement system for the angular reflectance of materials.

その特性の積分球の SRDF への影響の検討には至っていない。

今回、材料の反射角特性測定装置と積分球による拡散反射率測定装置を組み合わせた簡易的な BRDF の測定装置を構築し、市販されている積分球壁面材料として、2 種類の BaSO₄ (製造メーカーが異なる)、1 種類の PTFE の BRDF を測定比較し、積分球の中心に光源を点灯した場合や、2 π 配光光源を壁面点灯することを想定した積分球の SRDF を検討したので報告する。

2. 測定方法

今回検討に使用した BRDF 測定装置は、Xe 白色光源 (150 W) をビーム状に照射する投光部と、マルチチャンネル分光測定装置 (大塚電子製: MCPD-9800-3095C) を受光部とし、投光部と受光部が同軸独立に回転するステージの中心に試料を配置した。投光部の先端には、Xe 光源からファイバーで導いた光を、レンズ光学系を用いて試料面上の回転中心に試料に垂直に照明したとき約 5 × 5 mm のスポットが結像するようにした。受光部は、マルチチャンネル分光測定装置のファイバーの先端に遮光筒を設け、投

光光学系の投光角 α が 70° の状態で受光光学系の観測角 θ が $\pm 75^\circ$ の範囲で、投光部から投影された試料面上のスポット像が十分視野に入り、かつ周辺からの迷光を除去するようにした。測定光学系の概要を図1に示す。この測定装置は、積分球の内壁材料である完全拡散に近い試料の測定を目的とした簡易装置であり、偏向などを評価する機能は持たない。

測定手順を以下に示す。まず測定する投光角 α を設定し、その状態で受光光学系の観測角 θ を $\pm 75^\circ$ の範囲で 5° おきに測定する。このとき得られた分光測定装置の出力を $J(\alpha, \theta)$ とする。試料から観測角 θ 方向に反射する放射強度を $I(\alpha, \theta) [\mu\text{W}/\text{sr}]$ とすれば、

$$I(\alpha, \theta) = K \cdot J(\alpha, \theta) \quad \dots\dots\dots(2)$$

K は定数である。球体係数を $Z(\theta)$ とすれば、試料から反射する放射束 ϕ_r は次式で与えられる。

$$\phi_r = \sum_{\theta} Z(\theta) \cdot K \cdot J(\alpha, \theta) \quad \dots\dots\dots(3)$$

(2)式より K は、次式で求められる。

$$K = \phi_r / \sum_{\theta} Z(\theta) \cdot J(\alpha, \theta) \quad \dots\dots\dots(4)$$

(2)式および(3)式から放射強度 $I(\alpha, \theta)$ は、次式で求められる。

$$I(\alpha, \theta) = \frac{\phi_r \cdot J(\alpha, \theta)}{\sum_{\theta} Z(\theta) \cdot J(\alpha, \theta)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

放射束 ϕ_i の光が、入射角 α で試料面上に面積 S の像を投影したとすれば、 θ 方向から観測される放射輝度 $B(\alpha, \theta) [\mu\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)]$ は、次式で得られる。

$$B(\alpha, \theta) = \frac{I(\alpha, \theta)}{S \cdot \cos \theta} \quad \dots\dots\dots(6)$$

一方その放射照度 $E(\alpha)$ は、放射束 ϕ_i の光が入射角 α で試料面上に、面積 S の像を投影して得られるから、

$$E(\alpha) = \phi_i / S \quad \dots\dots\dots(7)$$

(6)、(7)式より試料のBRDF $f_r(\alpha, \theta) [1/\text{sr}]$ は、次式から得られる。

$$\begin{aligned} f_r(\alpha, \theta) &= B(\alpha, \theta) / E(\alpha) \\ &= \frac{\phi_r}{\phi_i} \cdot \frac{J(\alpha, \theta)}{\sum_{\theta} Z(\theta) \cdot J(\alpha, \theta)} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \\ &= \frac{J(\alpha, \theta)}{\sum_{\theta} Z(\theta) \cdot J(\alpha, \theta)} \cdot \frac{\rho_s}{\cos \theta} \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

(8)式において $\rho_s = \phi_r / \phi_i$ は、試料の拡散反射率である。

実際の測定では、図1に示した反射角特性測定装置を用いて、 θ を $-75^\circ \sim +75^\circ$ の範囲で 5° 間隔で試料の $J(\alpha, \theta)$ を測定して(3)式より ϕ_r を求めた。なお、入射光と同じ方向すなわち再帰正反射となる値は、受光光学系が投光光学系を遮り測定できないため、前後の反射角度のデータから補間により推定した。また ρ_s は、試料面の鉛直方向に対して 8° の方向から白色光を照射し、その反射成分を、直径15 cmの積分球を介して分光測定器で求めた。使用した反射率標準は、Labsphere 社製 SRS-99 (NIST トレーサブル) である。

3. 評価した試料

今回、市販されている積分球内壁材料として、2種類の BaSO_4 (製造メーカーが異なる)、1種類の PTFE 材料の二方向反射率分布関数 BRDF を測定比較した。試料は各積分球と同じ拡散反射材料を設けた積分球窓のフタ (平面状) を用いた。以下 BaSO_4 反射材料を BASO-1、BASO-2 と称し、PTFE 反射材料を PTFE-1 と称して説明する。それぞれの反射材料の分光反射率を図2に示す。参考までに BASO-1、BASO-2、PTFE-1 のデジタル顕微鏡写真 (30倍) を、図3～図5に示す。

図2 積分球内壁コーティング材料の分光反射率
Fig.2 Spectral reflectance of three interior coatings for integrating sphere.

図3 BASO-1のデジタル顕微鏡写真 (30倍)
Fig.3 Microphotograph of the coating sample BASO-1 ($\times 30$).

図4 BASO-2のデジタル顕微鏡写真 (30倍)
Fig.4 Microphotograph of the coating sample BASO-2 ($\times 30$).

図5 PTFE-1のデジタル顕微鏡写真 (30倍)
Fig.5 Microphotograph of the coating sample PTFE-1 ($\times 30$).

試料 BASO-1 の、デジタル顕微鏡（キーエンス VHX-1000）の粒径測定機能での測定値は約 $70\ \mu\text{m}$ であった。これに対して試料 BASO-2 の粒径は約 $180\ \mu\text{m}$ と倍以上であった。一方、試料 PTFE-1 は硫酸バリウムの吹きつけ塗装と異なり、PTFE 焼結体の削り出しであるため表面状態が異なるが、その凹凸は $50\ \mu\text{m}$ 以下であった。

4. BRDF 測定結果

測定結果の例として波長 $488\ \text{nm}$ での BRDF を示す。試料 BASO-1 の入射角 α を $10^\circ \sim 70^\circ$ に対する BRDF を図 6 に示す。光は観測角 θ の + 側から入射させた。なお、入射光と同じ方向すなわち再帰正反射となる値は、受光光学系が投光光学系を遮り測定できないため、前後の反射角度の値から補間で求めた。測定値は、試料を 90° 回転させた 2 断面、各 4 回測定の実測値で、観測角 $\pm 45^\circ$ の範囲での両者の再現性は 1 % 以内であったため、BRDF の異方性はないと考える。反射光の配光特性をわかりやすくするため、試料の BRDF に $\cos \theta$ を掛けた CCBDF (cosine-corrected BRDF) を極座標で図 7 に示す。また、図 8 に入射角 60° で波長 $400 \sim 700\ \text{nm}$ までの BRDF を $50\ \text{nm}$ おきに測定した結果を示す。測定の再現性から考えて、波長依存性はほとんど見られなかった。

試料 BASO-2 の波長 $488\ \text{nm}$ における、入射角 α を $10^\circ \sim 70^\circ$ に対する BRDF を図 9 に、CCBDF を図 10 に示す。測定値は、試料を 90° 回転させた 2 断面、各 4 回測定の実測値で、観測角 $\pm 45^\circ$ の範囲での両者の再現性は 1 % 以内であったため、BRDF の異方性はないと考える。また、図 11 に、入射角 60° での波長 $400 \sim 700\ \text{nm}$ までの BRDF を $50\ \text{nm}$ おきに測定した結果を示す。測定の再現性から考えて、波長依存性はほとんど見られなかった。

図 6 入射角 $10^\circ \sim 70^\circ$ での BASO-1 の波長 $488\ \text{nm}$ における BRDF 測定値
Fig.6 In-Plane BRDF measured value of BASO-1 at $488\ \text{nm}$ when the angle of the incident light is from 10° to 70° .

図 7 入射角 $10^\circ \sim 70^\circ$ での BASO-1 の波長 $488\ \text{nm}$ における CCBDF
Fig.7 In-Plane CCBDF measured value of BASO-1 at $488\ \text{nm}$ when the angle of the incident light is from 10° to 70° .

図 8 PTFE-1 の BRDF の波長依存性
Fig.8 Wavelength dependence for BRDF of BASO-1.

図 9 入射角 $10^\circ \sim 70^\circ$ での BASO-2 の波長 $488\ \text{nm}$ における BRDF 測定値
Fig.9 In-Plane BRDF measured value of BASO-2 at $488\ \text{nm}$ when the angle of the incident light is from 10° to 70° .

図 10 入射角 $10^\circ \sim 70^\circ$ での BASO-2 の波長 $488\ \text{nm}$ における CCBDF
Fig.10 In-Plane CCBDF measured value of BASO-2 at $488\ \text{nm}$ when the angle of the incident light is from 10° to 70° .

図 11 BASO-2 の BRDF の波長依存性
Fig.11 Wavelength dependence for BRDF of BASO-2.

試料 PTFE-1 の波長 488 nm における入射角 α を $10 \sim 70^\circ$ に対する BRDF を図 12 に、CCBRDF を図 13 に示す。測定値は、試料を 90° 回転させた 2 断面、各 4 回測定の実測値で、観測角 $\pm 45^\circ$ の範囲での両者の再現性は 1 % 以内であったため、BRDF の異方性はないと考える。また、図 14 に、入射角 60° での波長 $400 \sim 700$ nm までの BRDF を 50 nm おきに測定した結果を示す。測定の再現性から考えて、波長依存性はほとんど見られなかった。

試料 BASO-1 は、入射角が 60° 程度まで完全拡散に近い特性を持つ。これに比べて試料 BASO-2 は、同じ硫酸バリウムコーティングでありながら、光入射側の BRDF が高くなっている。すなわち再帰性の反射が強く、特に光の入射角が大きいくほど顕著となる。

図 12 入射角 $10^\circ \sim 70^\circ$ での PTFE-1 の波長 488 nm における BRDF 測定値
Fig.12 In-Plane BRDF measured value of PTFE-1 at 488 nm when the angle of the incident light is from 10° to 70° .

図 13 入射角 $10^\circ \sim 70^\circ$ での PTFE-1 の波長 488 nm における CCBDF
Fig.13 In-Plane CCBDF measured value of PTFE-1 at 488 nm when the angle of the incident light is from 10° to 70° .

図 14 PTFE-1 の BRDF の波長依存性
Fig.14 Wavelength dependence for BRDF of PTFE-1.

一方 PTFE コーティングである試料 PTFE-1 の場合、BASO-2 とは対照的に反射側の BRDF が大きくなる。すなわち正反射成分が比較的大きかった。これは、PTFE の標準反射板の特性⁶⁾⁻⁸⁾と同じ傾向であった。

5. 光源を積分球中心に点灯する場合の積分球内壁の BRDF と内面応答度分布 SRDF

積分球は、その内壁が完全拡散反射であることを前提として、原理的に積分球内壁に入射した光束が、その場所によらず積分球内壁の照度（壁面の受光器の応答）に比例する。このとき、積分球内壁の光を照明した場所による応答の変化を積分球内面応答度分布 SRDF という。先に述べた 3 種類の内壁コーティングの BRDF の完全拡散からの外れは、この積分球の応答度分布 SRDF に影響を与えることが予想される。なお、4 章において各試料の BRDF に顕著な波長依存性が見られないことから、以下の説明を測光量（光束、照度など）で述べる。

積分球内の中心に光源を点灯する場合には、光源からの光は常に積分球壁面に垂直に入射するが、受光器が積分球壁面にあるため、積分球壁面から受光器への光の入射角が、積分球内部の場所により大きく変化する。そこで、先に測定した 3 種類の積分球内壁コーティングの BRDF に対する積分球内面の応答度分布 SRDF を解析的に比較した。図 15 は SRDF を求める積分球モデルである。図において、光源から光束 ϕ の光が積分球壁面上の面 S を入射角度 $\alpha = 0$ で照明する場合を考える。積分球内壁の平均反射率を ρ 、面 S の反射率を ρ_s 、積分球の半径を r とし、面 S から角度 θ 方向にある受光器の受光面の照度 E_d を次式で求めた。なお、図 15 のモデルは、光源および受光器の受光面の大きさが積分球の内面積に比べて十分小さいとし、光源と受光器の間の遮光板は無視できるとした。

$$E_d = \frac{\phi \cdot f_r(\alpha, \theta)}{4r^2} + \frac{\phi \cdot \rho_s}{4\pi \cdot r^2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} \quad \text{.....(9)}$$

(9) 式の第 1 項は、光源が直接照明した光に対する、面 S の 1 次反射光のうち直接、受光器を照明する成分による照度である。第 2 項は、面 S の反射光が積分球内壁で繰り返し反射されて、受光器を照明する照度成分であるが二次反射光以降の BRDF の偏りは考慮できていない。SRDF は、積分球の受光器の斜入射光特性が余弦則に完全に一致するものとした受光器出力として求め、受光器への入射角 θ の関数で表した。なお、本稿では解析を簡単にするために $\rho_s = \rho$ として計算した。

図 16 に、試料 BASO-1 を内壁の反射材料とした積分球において、積分球中心から照射した光に対する SRDF を、BASO-1 の積分球内壁平均反射率 ρ をパラメータとし、 $\theta = 0$ での値で規格化して

図 15 積分球の中心に光源を点灯した場合の内面の応答度分布 SRDF 解析モデル

Fig.15 Optical model for SRDF of integrating sphere in which the light source emits light on the center of the sphere.

図16 試料 BASO-1の反射率に対する、光源を積分球中心で点灯した場合の積分球の相対 SRDF 解析値

Fig.16 Calculation result of SRDF in BASO-1 coating integrating sphere.

解析的に求めた結果である。積分球内壁の平均反射率 ρ が97 %と比較的高い場合は、SRDFは0.5 %以内の変化であるが、 ρ が90 %まで低下してもSRDFの変化は1.5 %以内であった。これは、積分球で光源を積分球中心に点灯した場合に、光源からの直接光が積分球壁面に入射する角度は、積分球の場所によらず $\alpha = 0$ であり、内壁反射材料のBRDFの完全拡散からのはずれの影響は小さいためと考えられる。

図17は、試料 BASO-2を内壁の反射材料とした積分球において、積分球中心から照射した光に対するSRDFを、BASO-2の反射率 ρ をパラメータとし、 $\theta = 0$ での値で規格化して求めた結果である。積分球内壁の平均反射率 ρ が97 %と比較的高い場合は、SRDFは0.6 %以内の変化で、 ρ が90 %まで低下してもSRDFの変化は2 %以内である。試料 BASO-2は、試料 BASO-1に比べてBRDFが再帰性の反射が強いが、積分球で光源を積分球中心に点灯した場合に、光源からの直接光が積分球壁面に入射する角度は、積分球の場所によらず $\alpha = 0$ であり、内壁の反射材料のBRDFの再帰性反射の強さは表れないと考えられる。

図18は、試料 PTFE-1を内壁の反射材料とした積分球において、積分球中心から照射した光に対するSRDFを、PTFE-1の反射率 ρ をパラメータとし、 $\theta = 0$ での値で規格化して求めた結果である。積分球内壁の平均反射率 ρ が97 %と比較的高い場合は、SRDFは0.5 %以内の変化で、 ρ が90 %まで低下してもSRDFの変化は1.5 %以内である。試料 PTFE-1は、試料 BASO-1に比べてBRDFの正反射が強いが、積分球で光源を積分球中心に点灯した場合に、光源からの直接光が積分球壁面に入射する角度は、積分

図17 試料 BASO-2の反射率に対する、光源を積分球中心で点灯した場合の積分球の相対 SRDF 解析値

Fig.17 Calculation result of SRDF in BASO-2 coating integrating sphere.

図18 試料 PTFE-1の反射率に対する、光源を積分球中心で点灯した場合の積分球の相対 SRDF 解析値

Fig.18 Calculation result of SRDF in PTFE-1 coating integrating sphere.

球の場所によらず $\alpha = 0$ であり、内壁の反射材料のBRDFの正反射の影響は表れていない。

6. 光源を積分球壁面で点灯する場合の積分球内壁のBRDFと内面応答度分布SRDF

光源を積分球壁面に点灯させる場合、積分球壁面への光源からの光の入射角が、積分球内部の場所により大きく変化する。

ここでは、5章と同様に3種類の積分球内壁の反射材料のBRDFに対する積分球内面の応答度分布SRDFを解析的に比較した。図19はSRDFを求める積分球モデルである。図において、光源から光束 ϕ の光が積分球壁面上の面Sを角度 α で照明する場合を考える。面Sの拡散反射率 ρ 、積分球内壁の平均反射率を ρ 、積分球の半径を r とすれば、面Sから角度 θ 方向にある受光器の受光面の照度 E_d は、(9)式で求めた。なお、光源を積分球壁面で点灯する場合、図19において $-90^\circ < \theta < -45^\circ$ の範囲は、一般に光源からの直射光を遮断する遮光板が設けられるため、SRDFの解析は $-25^\circ < \theta < 75^\circ$ とした。

図20は、試料 BASO-1を内壁反射材料とした積分球において、積分球壁面の光源からの光に対するSRDFを、積分球の平均反射率 ρ をパラメータとし、 $\theta = 0$ での値で規格化して求めた結果である。積分球内壁の平均反射率 ρ が97 %と比較的高い場合でも、SRDFは1 ~ 2 %変化し、 ρ が90 %まで低下すると、 $-25^\circ < \theta < 75^\circ$ でのSRDFの変化の幅は5 %程度に広がる。これは、積分球で光源を壁面点灯した場合に、光源からの直接光が積分球壁面に入射する角度が積分球の場所によって大きく変化するため、内壁反射材料のBRDFの完全拡散からのはずれの影響が現れてい

図19 積分球壁面に光源を点灯した場合の内面の応答度分布SRDF解析モデル

Fig.19 Optical model for SRDF of integrating sphere in which the light source emits light on the center of the sphere.

図20 試料 BASO-1の反射率に対する壁面点灯の場合の積分球の相対 SRDF 解析値

Fig.20 Calculation result of SRDF in BASO-1 coating integrating sphere.

るためと考えられる。

図21は、試料 BASO-2を内壁反射材料とした積分球において、積分球壁面の光源からの光に対する SRDF を、積分球の平均反射率 ρ をパラメータとし、 $\theta = 0$ での値で規格化して求めた結果である。試料 BASO-2は、試料 BASO-1に比べて BRDF が再帰性の反射特性が強いが、図21において $45^\circ < \theta < 75^\circ$ で、積分球壁面の放線に対して、光源から積分球壁面への入射光と、壁面から受光面への反射光の角度が同じ側となる再帰性の反射側のため SRDF の変化の幅は大きくなっている。 $-25^\circ < \theta < 75^\circ$ の SRDF の変化の偏りは ρ が低下するほど大きくなり、 ρ が90 %まで低下すると SRDF の変化の幅は8 %を超える。

図22は、試料 PTFE-1を内壁に使用した積分球において、積分球壁面からの光に対する SRDF を、積分球の平均反射率 ρ をパラメータとし、 $\theta = 0$ での受光器出力で規格化して求めた結果である。試料 PTFE-1は、試料 BASO-1に比べて BRDF の正反射特性が強いが、図22において $0^\circ < \theta < 45^\circ$ で、積分球壁面の放線に対して光源から積分球壁面への入射光と、壁面から受光面への反射光の角度は正反射側となるため SRDF が大きくなっている。この SRDF の変化は、 ρ が低下するほど大きくなる。また、 $\theta < 0^\circ$ では壁面から受光面への反射光の角度が同じ側となり SRDF が小さくなっている。これは BRDF が正反射側に偏っていることの影響と思われる。 $-25^\circ < \theta < 75^\circ$ の SRDF の変化は、 ρ が低下するほど大きくなり、 ρ が90 %まで低下すると SRDF の変化は8 %を超える。

図19に示すように、光源を積分球壁面に点灯させる場合、光源の機械光軸は、 $\theta = 45^\circ$ の位置を通る。試料光源の全光束を測定する場合、全光束標準光源と試料光源の配光が、ほぼ同じであ

図21 試料 BASO-2の反射率に対する壁面点灯の場合の積分球の相対 SRDF 解析値

Fig.21 Calculation result of SRDF in BASO-2 coating integrating sphere.

図22 試料 PTFE-1の反射率に対する壁面点灯の場合の積分球の相対 SRDF 解析値

Fig.22 Calculation result of SRDF in PTFE-1 coating integrating sphere.

ば積分球の SRDF に起因する不確かさは小さいが、標準光源が 2π 配光なのに対して、試料光源が狭帯域の配光を持ち、試料光源の最大光度が試料光源の機械光軸を外れる場合、積分球壁面の BRDF が正反射方向や、再帰性の方向に偏る場合、その不確かさは大きくなる。その場合、試料光源を積分球壁面に装着した状態で回転させると、検出器の出力が変動する。

7. まとめ

今回、簡易的な BRDF の測定装置を構築し、市販されている2種類の BaSO_4 (製造メーカーが異なる) と、1種類の PTFE の、積分球の内壁コーティングの BRDF を測定し比較した。これらのコーティング材料の拡散反射率は、いずれも可視波長域で97 %以上であり、積分球の内壁コーティングとしては高い値を示すものであった。

BRDF 測定の結果、コーティング材料によっては、入射角が大きい場合には、正反射や再帰性の反射が現れ、完全拡散からの外れが大きくなることが明らかとなった。特に BaSO_4 は、標準反射板のような圧縮成形⁶⁾⁻⁸⁾と比べて、バインダーを使用した塗布面であるため表面状態が異なり、その BRDF も異なることがわかった。

これらのコーティングの BRDF を使って、積分球の中心に光源を点灯した場合の積分球の SRDF を解析的に求めた。この結果、光源からの光は積分球壁面に、常に垂直に入射するため、コーティング材料の BRDF の正反射方向や再帰性方向の反射の偏りの影響に顕著な差は見られなかった。

次に積分球壁面に 2π 配光の光源を設置した場合の、積分球の SRDF を解析的に求めた。この結果、BRDF が正反射側や再帰性の反射側に偏りがある場合、拡散反射率が ρ が90 %まで低下すると SRDF の変化は8 %を超えることが明らかとなった。

今回解析した積分球の SRDF は、受光器の斜入射光特性が余弦則に合致したとして求めたものであり、受光器の斜入射光特性を考慮した場合¹¹⁾には、さらに SRDF の変化は大きくなることが予想される。

実際に、標準電球と異なる 2π 配光の光源を測定した場合、積分球の大きさや内部構造物の影響によって、測定値の不確かさが増大することが報告¹²⁾されている。この要因の1つとして積分球内部の SRDF の不均一が、内部構造物などにより発生したと考えられる。このことから積分球の内壁の材料は、積分球の SRDF の不均一を増大させないために、拡散反射率が十分大きく、その BRDF が、壁面法線に対して対称性を持ち、より完全拡散に近いものを選択する必要があると考える。

今回の積分球モデルは、実際の積分球と異なり遮光板などの内部構造物を想定していない。今後は、これらの影響が加わった実際の積分球の SRDF での検証を行う予定である。

参考文献

- (1) 大久保：積分球を用いた光測定方法，照学誌，94-2，pp.141-148 (2010)．
- (2) Y.Ohno：Integrating sphere simulation：application to total flux scale realization, Applied Optics, 33-13, pp.2637-2647 (1994)．
- (3) 丹羽，神門，市野，木下，座間：分光全放射束標準開発の現状（分光式球形光束計の整備と評価），照学全大，11-7 (2011)．
- (4) 大久保，三島：球形光束計用受光器の斜入射光特性の検討，照学誌，96-11，pp.761-766 (2012)．
- (5) JIS C 7801-2009：一般照明用光源の測光方法．
- (6) JIS C 8152-1-2012：照明用白色発光ダイオードの測光方法－第1部：LED パッケージ．
- (7) JIS C 8152-2-2012：照明用白色発光ダイオードの測光方法－第2部：LED モジュール及びLED ライトエンジン．
- (8) IESNA-LM-79-08：Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products.
- (9) A.Ferrero et al.：Spectral and geometrical variation of the bidirectional reflectance distribution function of diffuse reflectance standards, Appl. Opt., 51, pp.8535-8540 (2012)．
- (10) A.Bhandari et al.：Bidirectional reflectance distribution function of Spectralon white reflectance standard illuminated by incoherent unpolarized and plane-polarized light, Appl. Opt., 50, pp.2431-2442 (2011)．
- (11) K.J.Voss and D.Zhang：Bidirectional reflectance of dry and submerged Labsphere Spectralon plaque, Appl. Opt., 45, pp.7924-7927 (2006)．
- (12) 大久保，齋藤，廣川，高橋，志賀：球形光束計の測定値比較，照学誌，98-8A，pp.362-368 (2014)．
(受付日2014年9月29日／採録日2016年6月14日)

大久保 和明（正会員）

大塚電子(株)

1979年3月，埼玉大学大学院光学研究科電子工学専攻修士課程修了．同年，松下電器産業(株)入社．2007年6月，大塚電子(株)入社．主として測光測色および紫外・赤外の放射測定に関する研究に従事．1995年，博士（学術）．

大澤 祥宏（正会員）

大塚電子(株)

1992年3月，岡山大学大学院自然科学研究科物理化学専攻博士課程修了．理学博士．同年4月，大塚電子(株)入社．光散乱測定装置，FTIR によるガス定量装置の開発に従事後，現在は蛍光体量子効率測定装置の開発に従事．日本化学会，高分子学会．