

論文

分光放射輝度の実用校正技術の開発

岩永 敏秀*¹⁾ 中村 広隆*¹⁾ 海老澤 瑞枝*¹⁾ 山本 哲雄*¹⁾

Development of calibration system for spectral radiance measurement

Toshihide Iwanaga*¹⁾, Hirotaka Nakamura*¹⁾, Mizue Ebisawa*¹⁾, Tetsuo Yamamoto*¹⁾

We investigated a calibration system in which a spectral irradiance halogen lamp and a diffuser were used for measuring spectral radiance for the photobiological safety of lamps and lamp systems. We measured the spectral reflectance of a diffuser (PTFE and BaSO₄) with a changing angle of detection. Deviation from Lambert's cosine law of spectral reflectance is the smallest in the vicinity of 40 degrees. This result shows that the angle is suitable for the detection angle. We measured the spatial nonuniformity of radiation from a spectral irradiance standard lamp, which is about 0.8% less. The influence of the nonuniformity upon spectral radiance measurement was found to be small. As a result, we showed this calibration technique was an effective method for spectral radiance calibration.

キーワード：分光放射輝度, ランプの光生物学的安全性, 拡散反射板, 分光放射照度, ランベルトの余弦則

Keywords: Spectral radiance, Photobiological safety of lamps, Diffuser, Spectral irradiance, Lambert's cosine law

1. まえがき

高輝度 LED や HID ランプ (高輝度放電ランプ) などの普及と高輝度化に伴い, 放射光の生体 (人間の眼や皮膚) に対する安全性への懸念が強くなっている。それを受けて, ランプの安全性評価に関する規格が CIE (国際照明委員会) と IEC のダブルロゴ規格 CIE S009:2002/IEC62471:2006 とし, 近年制定された⁽¹⁾。国内でも JIS 化の動きがあり, 今後, 同規格に沿った安全性評価のニーズが増大してくると考えられる⁽²⁾⁽³⁾。

上記の安全性評価には, 分光放射照度と分光放射輝度の測定が必要とされる。このうち, 分光放射照度測定は, 参照標準となる分光放射照度標準電球のトレーサビリティ (JCSS) が確保されていて, 測定方法も確立されている。一方, 分光放射輝度測定は, 上記生体安全性評価のうち, 眼の網膜へのリスクを評価するために, 紫外域から近赤外域 (300nm~1400nm) の波長範囲について必要となる。赤外域 (2μm~) では黒体炉を参照標準とした測定が一般的に行われているものの, 紫外域から近赤外域については国内の参照標準が存在しない。国外では, 積分球光源やリボンフィラメント電球による校正が行われている例もあるが, 高価な設備と頻繁な校正を必要とするため, 利用しにくい⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本研究では, ハロゲン電球と拡散反射板を使った校正技術の開発を行うことで実用的な生体安全性評価方法の確立を目指す。本校正技術は, 輝度計や分光放射計の校正技術として既に使われており, 分光放射照度や光度についての

標準電球と拡散反射板の分光放射輝度率 (ラジアン平方メートル) から, 分光放射輝度の校正を行うものである。ここで, 分光放射輝度率とは, 測定の立体角を十分に小さくした場合の分光立体角反射率と理想的な完全拡散面の分光立体角反射率の比をいい, 国外の標準機関などでその校正が行われている⁽⁶⁾。しかし, 上記 CIE S009:2002 規格に基づいた生体安全性評価のための測定には, 拡散反射板の分光立体角反射率の角度特性や光源の分光放射照度むらなどを測定波長域にわたって詳細に検討する必要がある。

本研究では, ハロゲン電球と拡散反射板の特性を調査・検討し, 安定性, 再現性の高い校正技術の開発を目的とした。今回, ハロゲン電球の放射光の空間的照度むら, 拡散反射板の分光立体角反射率の角度特性および, それらを踏まえた不確かさの算出などの検討を行った。本校正技術の開発によって, 分光放射輝度測定による光源の生体安全性評価を可能とし, 照明や光源関連中小企業の生体安全性を確保した製品開発を支援する。

2. 校正の理論

光源 (分光放射照度の値がついたもの) と拡散反射板を図 1 のように配置したとき, 拡散反射板の反射面で反射した全分光放射束 $\Phi_e(\lambda)$ は, 反射面の光源からの放射光による分光放射照度 $E(\lambda)$, 反射面の分光反射率 $\rho(\lambda)$ および反射面の面積 (十分小さく, 面内で分光放射照度と分光反射率が一樣であると仮定する) dS を使って, 次式で表せる。

$$\Phi_e(\lambda) = \rho(\lambda)E(\lambda)dS \dots\dots\dots(1)$$

*¹⁾ 光音グループ

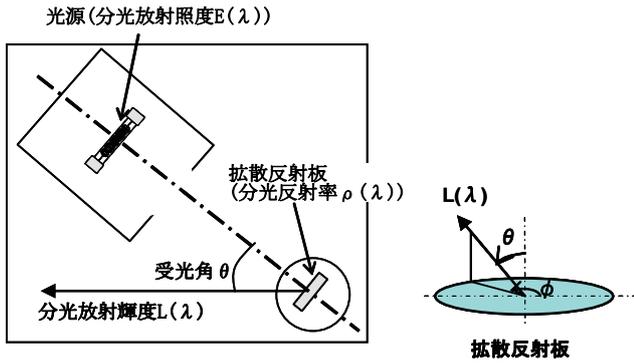


図1. 分光放射照度標準電球と拡散反射板を使った
分光放射輝度の校正

一方、反射面で反射した放射束の配光分布 (θ, ϕ 方向の放射強度) を $I_\lambda(\theta, \phi)$ で表すと

$$\Phi_e(\lambda) = \iint I_\lambda(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \dots\dots\dots(2)$$

の関係がある。今、反射面が均等拡散面 (ランベルトの余弦則に従う面=観測方向により輝度に変化しない面) であるとき、反射面の法線方向 ($\theta=0^\circ$) の放射強度を $I_\lambda(0)$ 、分光放射輝度を $L(\lambda)$ とすると次式が成立する。

$$I_\lambda(\theta, \phi) = I_\lambda(0) \cos \theta = L(\lambda) \cos \theta dS \dots\dots\dots(3)$$

(3)式を(2)式に代入して計算すると

$$\begin{aligned} \Phi_e(\lambda) &= \iint I_\lambda(0) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \\ &= 2\pi I_\lambda(0) \int_0^{\pi/2} \frac{\sin 2\theta}{2} d\theta = \pi I_\lambda(0) = \pi L(\lambda) dS \end{aligned} \dots\dots\dots(4)$$

(1)式と(4)式により次式が成立する。

$$L(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} E(\lambda) \dots\dots\dots(5)$$

(5) 式から、反射面の分光反射率と分光放射照度が既知であれば、分光放射輝度を決定することができる。(5) 式は、反射面が均等拡散面 (ランベルトの余弦則に従う面) であり、 $E(\lambda)$ と $\rho(\lambda)$ が面内で一様である場合のみ成立する。積分球内壁や反射率標準に用いられている拡散反射板は、均等拡散面に近い反射面として知られているが、本研究では改めて余弦則への一致度や反射面の照度むらの程度を測定により検討し、校正技術への適否を考察した。

3. 各種反射板の分光立体角反射率の角度依存性

3.1 実験方法 拡散性が良く、分光反射率の高いと思われる各種拡散反射板について、分光立体角反射率の角度依存性の測定を行い、ランベルトの余弦則からの外れについて考察を行った。測定に用いた反射材料は、PTFE (焼結品)、BaSO₄、セラミクス (つや有り)、セラミクス (つやなし)、オパールガラスの5種類とした。BaSO₄ および PTFE

(焼結品) は、拡散反射率の標準や積分球内壁の材料として良く用いられている。セラミクスも反射率の標準として用いられる。オパールガラスは、拡散性の高い透過材料として、積分球の窓材などに用いられる。分光立体角反射率の角度依存性は、分光光度計 (島津製作所製 SolidSpec3700DUV) に変角測定装置 (ゴニオメーター) を組み合わせた装置を用い、照射光の入射角と受光角を変化させて測定した。

3.2 結果と考察 分光立体角反射率の角度依存性測定結果の一例 (入射角 10°) を図2に示す。セラミクス (つや有り) とオパールガラスについて、各波長の結果とも受光角 10° 、すなわち正反射方向で反射率が突出して高くなっている。両材料とも光沢を持つため、強い正反射を生じていることが分かる。紫外域から近赤外域 (300nm~1400nm) にかけて、余弦配光 (すなわちランベルトの余弦則) への一致度が最も高いのは、PTFE (焼結品) および BaSO₄ であった。この結果から、PTFE (焼結品) または BaSO₄ が校正の標準板として適当であると考えられる。さらに校正の幾何学的条件を検討するため、上記2種類の材料について、光の照射角と受光角に関する角度依存特性を測定した。照射角を変化させたときの角度依存特性の影響は顕著には見られなかった。一方、受光角を変化させたときのランベルトの余弦則からの外れは、図3のように得られた。PTFE (焼結品) および BaSO₄ ともに図に示されているように各波長とも受光角 40° 付近でランベルトの余弦則からの外れが最小となる。よって、受光角 40° の配置で分光放射輝度の校正を行うことが適当である。

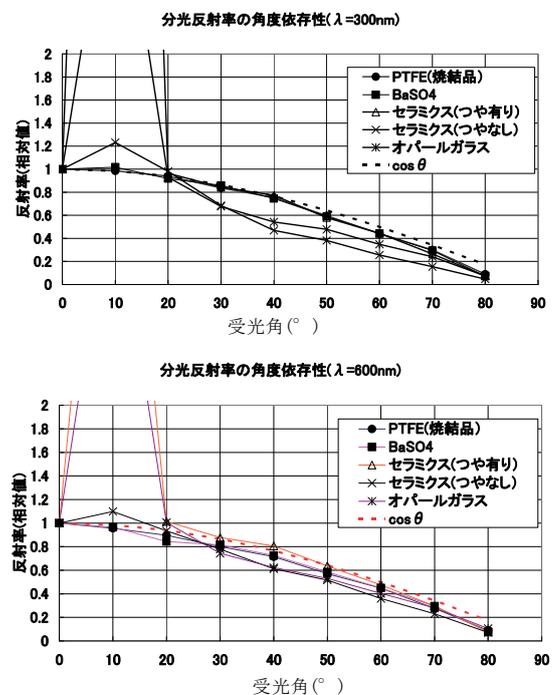


図2. 分光反射率 (分光放射輝度率) の角度依存性
(上) $\lambda=300\text{nm}$ (下) $\lambda=600\text{nm}$

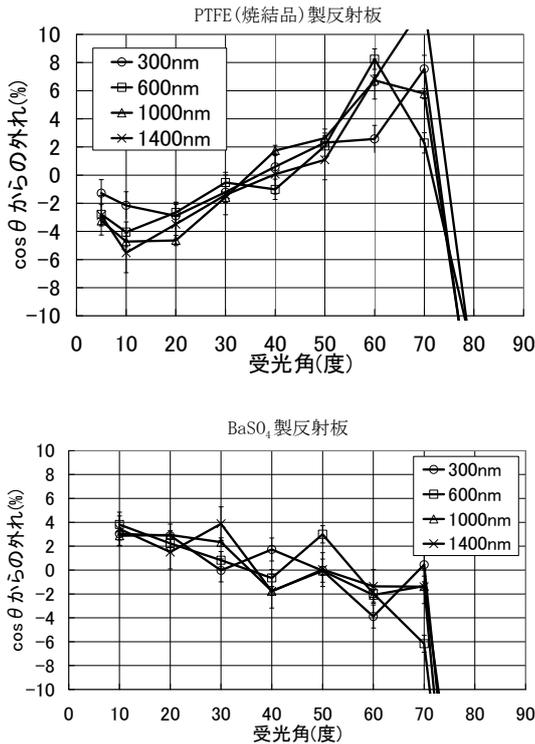


図3. 分光反射率(分光放射輝度率)の余弦則からの外れ
(上)PTFE(焼結品)製反射板 (下)BaSO₄製反射板

4. ハロゲン電球の照度むら

4.1 実験方法 本校正技術に適した光源としては、紫外域から近赤外域(300nm~1400nm)の波長範囲にかけて、切れ目のない連続的なスペクトルを有する高出力のハロゲン電球が有利である。本研究では、500W および 1000W のハロゲン電球 3 種類を選択し、特性の測定を行い、校正技術への適否を検討した。このうち、500W ハロゲン電球(JPD100V-500WCS)は、日本国内で、分光放射照度標準電球として利用されている。その他の2種類の1000W ハロゲン電球は、光学機器用(JPD100V-1000WC)と特殊照明用(JCS100V-1000WC)を使用した。1000W 品は、500W 品に比べ放射照度が大きく、特に紫外域での測定に有利である。上記ハロゲン電球について、空間的照度むらの測定を行った。空間的照度むらは、V(λ)受光器の受光位置を変えたときの空間的照度変化を測定した。空間的照度むらは本来、校正波長域(300nm~1400nm)の各波長毎に評価する必要があるが、相対分光分布の空間的変化が照射範囲内で十分小さいと考えられるので、評価を照度測定により行った。

4.2 結果と考察 空間的照度むらの測定結果を図4に示す。照度むらが最も小さかったのは、JPD100V-500WCS(最大照度差0.8%)、最も大きかったのは、JCS100V-1000WC(最大照度差4.5%)であった。この照度むらによりどの程度の校正不確かさが生じるのかを見積もるため、以下の検討を行った。図5に示すような分光放射輝度の校正光学系を仮定したとき、分光器に入射する放射束は、以下の式に示すように拡散反射板上を微小区間に分割したときの各区間の分光放射照度を使って次式で表すことができる。

$$\Phi_e(\vec{p}, \lambda) = \int \frac{\rho(\lambda)E(\vec{p}, \lambda) \cos \theta}{\pi r^2} dS \dots \dots (6)$$

$$E(\vec{p}, \lambda) = \varepsilon(\vec{p})E(\vec{o}, \lambda) \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 \vec{p} は、拡散反射板上の任意の微小区間の位置ベクトル、 $\Phi_e(\vec{p}, \lambda)$ は、分光器へ入射する放射束、 $\rho(\lambda)$ は拡散反射板の分光反射率、 $E(\vec{p}, \lambda)$ は拡散反射板上の分光放射照度、 r は点 \vec{p} と受光位置との距離、 $\varepsilon(\vec{p})$ は拡散反射板上の照度むらである。上記の Φ_e について図4で得られた照度むらがある場合と照度むらがない理想的な場合を計算し、その差を不確かさとした。不確かさの算出の結果、JPD100V-500WCSとJPD100V-1000WCSで0.11%、JCS100V-1000WCSで0.21%であった。不確かさの大きさは小さく、拡散反射板上の照度むらによる測定不確かさへの影響は小さいことを示している。

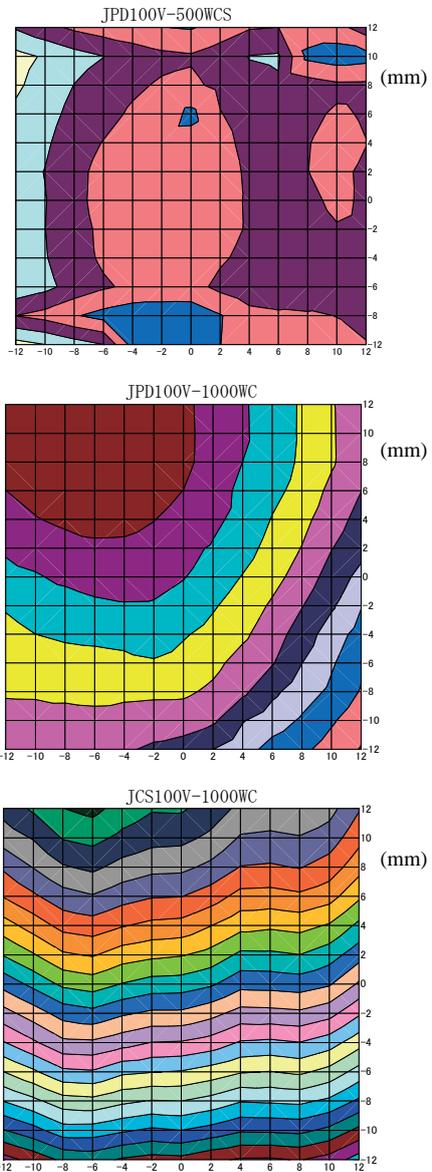


図4. 拡散反射板上の照度むら
(上)JPD100V-500WCS (中)JPD100V-1000WC (下)JCS100V-1000WC
等高線は、0.2%の照度変化を示す。

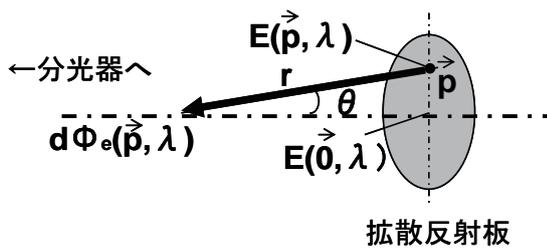


図5. 分光放射輝度の照度むらによる不確かさの検討

5. 不確かさの検討

5.1 不確かさ要因と算出方法 今回の分光放射輝度校正技術の不確かさ要因として、3および4で述べた拡散反射板の反射特性、光源の照度むらなどのほか、分光放射照度標準電球の校正值、分光反射率の校正值およびその経時変化などの要因が考えられる。分光放射照度標準電球の校正不確かさは、一次標準電球（JCSS トレーサブル）の校正不確かさのほか、常用標準電球への値付け時の測定繰り返し性、電圧設定、波長正確さ、受光器の直線性などを考慮する必要がある。今回は、一次標準電球と同種のハロゲン電球の値付けを行うことから、一次標準電球の校正不確かさ（校正証明書の値を利用）が支配的であると考え、この値のみを考慮した。分光反射率の校正值は、値付き（NIST トレーサブル）の PTFE 製拡散反射板を使用することを想定し、拡散反射板添付の校正証明書の値を利用した。分光反射率の経時変化は、PTFE 製および BaSO₄ 製拡散反射板の経年変化から推定した。

5.2 結果と考察 不確かさ算出結果を表1に示す。校正波長域によって、分光放射照度校正值、分光反射率の経時変化が異なる（紫外域での不確かさが大きい）。不確かさへの寄与が大きいのは、分光放射照度標準電球の校正值（一次標準電球の校正值）および分光反射率の経時変化である。分光反射率は短波長域ほど経時変化が大きい。紫外域（300nm~400nm）について PTFE 製は、平均 2.6%/年、BaSO₄ 製は、平均 4.4%/年の経時変化が生じている。校正周期を1年とすると経時変化による不確かさは最大 1.52%と計上され、大きな不確かさ要因となる。他の要因は、全体の不確かさにはほとんど寄与しない。分光反射率の経時変化について、十分に管理することが不確かさを抑える上で重要であると思われる。

表1. 校正の不確かさ

不確かさ要因	標準不確かさ u(xi)	感度係数 ci	ui(y)= ci u(xi)
分光放射照度校正值	1.6~3.2	1	1.6~3.2
照度変動	0.032~0.070	1	0.032~0.070
照度むら	0.064~0.12	1	0.064~0.12
分光反射率の校正值	0.50	1	0.50
分光反射率の経時変化	0.012~1.52	1	0.012~ 1.52
余弦則からの外れ	1.0	1	1.0
電圧計の確度	0.0050	4	0.020
合成標準不確かさ			2.0~3.7
拡張不確かさ(k=2)			3.9~7.4

6. まとめ

分光放射輝度の実用的校正技術の開発を行った。ハロゲン電球と拡散反射板の特性を検討し、不確かさを算出した。σ=3.9~7.4% (k=2) の値が得られ、実用上十分な校正技術であることを示した。

(平成 22 年 6 月 30 日受付, 平成 22 年 8 月 20 日再受付)

文 献

- (1) CIE S009/IEC62471: "Photobiological safety of lamps and lamp systems"(2006)
- (2) TS C0038: "ランプ及びランプシステムの光生物学的安全性"(2004)
- (3) K.Kohmoto, Y.Nakazawa, K.Suzuki, H.Kondo: "Risk evaluation of LEDs with CIE photobiological lamp safety standard", CIE Compte Rendu, 25th Session, D6-22-25(2003)
- (4) G.P.Eppeldauer, S.W.Brown, T.C.Larason, M.Racz, K.R.Lykke: "Realization of a spectral radiance responsivity scale with a laser-based source and Si radiance metres", Metrologia, 37, 531-534(2000)
- (5) S.W.Brown, G.P.Eppeldauer, K.R.Lykke: "Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources, Applied Optics, 45(32), 8218-8236(2006)
- (6) C.J.Chunnillal, A.J.Deadman, L.Crane and E.Usadi: "NPL scales for radiance factor and total diffuse reflectance", Metrologia, 40, 192-195(2003)