

検出器の応答度に基づく測光・放射標準の 具現方法に関する調査研究

木下 健一*

(平成20年2月21日受理)

A survey of realization methods of photometric and radiometric standards based on responsivity of a detector

Kenichi KINOSHITA

1. 照度応答度に基づく標準の必要性

1.1 日本における測光標準供給体制の現状

人間の視覚に対する光の“明るさ”はカンデラ、ルクスなどの測光単位によって数値化されて表わされる。その“明るさ”の基準となるのが測光標準である。現在日本における光放射関連量の供給体制は図1のようになっている。光放射量に対する値付けの最上位に位置するのは産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ: National Metrology Institute of Japan）の持つ国家計量標準群である。この中で、光度、照度、分布温度など測光量の産業界への供給は標準電球によって担われている。すなわちNMIJ（または日本電気計器検定所）は登録事業者から校正を依頼された標準電球に対して値付けを行い、それら校正された標準電球が各事業者における測光量の基準となる。各校正事業者はそれら標準電球を用いて照度計、白熱電球、蛍光灯など一般ユーザ向け各種機器の校正を行う。

1.2 登録事業者から見た課題

上述のように、測光量の校正事業においては測光量の基準として標準電球が使用される。しかし、それら標準電球は価格が高価であり、また、その使用には熟練を要する。そのことが校正事業における困難のひとつとなっており、将来的に校正事業の拡大と普及の足かせともなり得る。そこで、標準電球に代わって測光量を維持することが可能な、照度応答度の値付けされた標準受光器（照度応答度標準受光器）を新たに標準として供給することにより、校正事業のコストダウンと効率化を達成することが望まれている。そのような標準受光器の供給が可能となれば、測光量の校正事業に新規参入を促進し、校正サービスの活性化につながるなどの効果も期待できる。例えば、事業者において使用される標準電球の価格は50万円～300万円程度であり、校正事業を維持するために年数個程度の電球の購入を要する場合もある。また、電球の設置はフィラメント部のアライメントに熟練を要し、半年程度の教育訓練期間が必要となる。

標準電球は標準として求められる性能を有する白熱電球であり、フィラメントはいずれ断線・焼損する。また標準電球は使用によって消耗し、その光度値が変化するため、概ね20時間ごとの再校正が必要である。そのため事業者においてはさらに複数の電球を準備し、上位標準と常用標準として管理する必要がある。また現在標準電球は受注生産であり、納期は半年程度必要である。従って急な需要には対応できず、事業者は複数の電球のストックを強いられる。標準電球の価格や納期の問題は外国製標準電球の使用を認めることによって改善を期待できるが、アライメントの難しさの問題は変わらない。また、日本における標準電球の作製は年々困難になっており、将来的に価格や納期の問題は悪化する恐れがある。

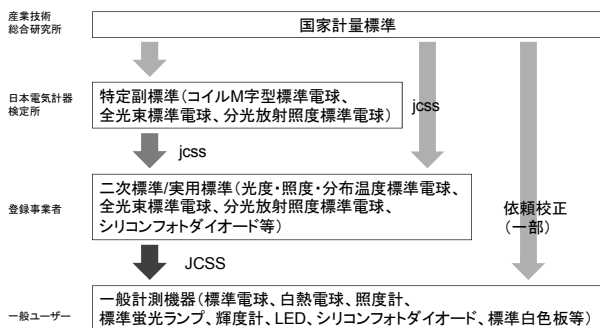


図1 光放射標準供給体制

* 計測標準研究部門 光放射計測科

一方、測光に用いられる受光器の価格は20万円～80万円程度である。また、受光器には長期間の経年変化の問題はあるが、電球のように使用時間数によって消耗することはない。従って値の維持のための群管理と階層化を簡略化できる可能性があり、その分維持コストを低減できる。また、その設置調整や使用法などの取り扱いも標準電球と比べて容易である。

1.3 国家標準研究機関としての課題

何らかの量の計測において、国家標準機関の持つ校正能力がその国における測定値の信頼性の上限を与える。図1において言えば、NMIJにおいて値付けられる測光量、放射量の不確かさが日本において可能な最高の校正能力を決定している。世界各国の国家標準機関における各量の校正能力は、計量標準の国際相互承認協定（CIPM-MRA）のAppendix CにおいてCalibration and Measurement Capability (CMC)として登録および表明されている。これらの値はその国における計測技術レベルの反映である。このCMC登録において国際的に先進的な地位を保つことが、計測技術分野におけるその国の先進性を示す証拠のひとつとなる。表1に主要国の光度と照度応答度におけるCMC登録状況を示す。光度校正の相対拡張不確かさ（ $k=2$ ）についてはNPL, PTBが0.4%，NIST, NIMが0.5%に対してNMIJは0.64%であり、若干の差が見られる。また、受光器を標準供給に用いる照度応答度についてはNMIJは未整備である。これらの値については国際的な競争が進んでおり、NISTなどでは照度応答度具現の不確かさ（ $k=2$ ）として0.1%を目指している¹⁾。日本として測光計測分野における国際的な地位を保持するためには、これら校正能力の改善が必要である。

1.4 照度応答度に基づく標準整備の目的

上述のような二つの課題を克服するために、以下の二つの達成目標を掲げる。一つ目は、照度応答度の値付けられた受光器を標準として事業者に供給する体制を構築することである。これによって事業者において標準電球を使用しない光度・照度の校正が可能となる。その主な狙いは校正事業の活性化であり、事業者は光度・照度の

表1 主要国CMC登録状況

主要国NMI	相対拡張不確かさ% ($k=2$)	
	光度	照度応答度
NIST	0.5	0.5
NPL	0.4	0.4
PTB	0.4	0.4
NIM	0.5	0.5
NMIJ	0.64	-

校正事業の実施において、標準電球の使用に加えて標準受光器の使用という選択肢を新たに持つことができる。標準電球と標準受光器のどちらを選択するかは事業者の事業形態に依存すると考えられるため、標準受光器の供給体制が確立された後も標準電球の供給は従来通り行う予定である。二つ目は、国家標準機関としての先進性保持に対応するもので、光度具現用受光器の改良・評価手法の見直しにより、NMIJにおける光度校正の不確かさを改善することである。これら二つの目標に対応して、受光器整備・開発の内容も二つに分けられる。ここでは、事業者への照度応答度標準受光器供給体制の構築を第1段階、光度不確かさ改善用受光器の開発と評価手法の見直しを第2段階とする。第1段階の達成は2009年度中を予定しており、第2段階は第1段階よりさらに数年後の目標達成を計画している。本稿では、第1段階の計画と課題について第2節において説明し、第2段階の方向性について第3節で述べる。また、それら標準受光器評価技術の波及効果について第4節で概観する。

2. 特定二次標準器としての照度応答度標準受光器供給体制の確立

2.1 校正事業者における現行の光度・照度校正システム

図2に校正事業者における現行の光度・照度校正方式を示す。校正値の基準となる光度値は光度標準電球が担っている。そこから校正器物である照度計および電球に値付けが行われる。校正器物として電球を校正の対象とする際には、なんらかの比較用受光器を用いる。光度標準電球の光度値を I_s 、電球の光度値を I_d とし、比較用受光器におけるそれぞれの出力を i_s 、 i_d とすると、 I_d は以下のように与えられる。

$$I_d = \frac{i_d}{i_s} I_s \quad (1)$$

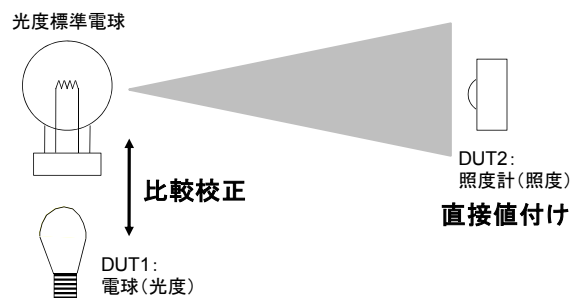


図2 校正事業者における現行の校正体系

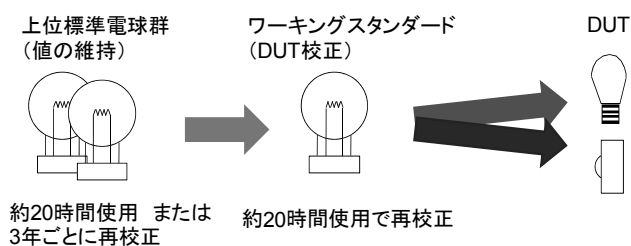


図3 標準電球の群管理と階層化

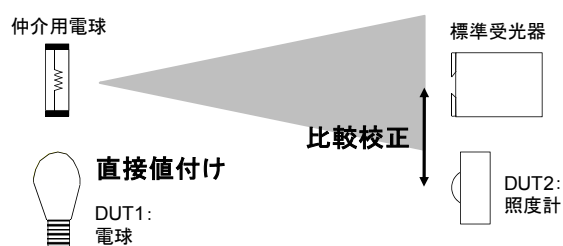


図4 照度応答度標準受光器を用いた校正体系

また、校正器物として照度計を校正の対象とする場合は、光度標準電球のフィラメントと照度計の基準面との距離を r とすれば、照度計の位置における照度値 E_d は

$$E_d = \frac{I_s}{r^2} \quad (2)$$

と与えられる。

このように校正器物は光度標準電球の光度値を元にして値付けされる。しかし、光度標準電球自体は使用することによって消耗しその値が変化する。そのため厳密にはその点灯電圧が一定であっても光度値は一定の値を保つとは限らない。従って、その変化に相当する量が不確かさに積まれることになる。この効果による不確かさへの寄与をある程度に抑えるためには標準電球の定期的な再校正が必要である。通常、光度標準電球については概ね20時間使用ごとに再校正を行う。従って、もし仮に校正事業において、1日4時間標準電球を使用したとすると、5日ごとに再校正が必要となる。この校正をその都度上位の校正機関に依頼することは効率的ではない。そのように使用頻度が高い場合には、図3に示すように、当該事業者内部において標準の階層化が行われる。また、光度の値は2本以上の複数の光度標準電球の平均値により維持される（群管理）。すなわち、上位校正機関によって値付けられた光度標準電球群によってもう一つ別の光度標準電球群に値を付けてワーキングスタンダードとする。日常的な校正器物の校正にはそのワーキングスタンダードによって行い、ワーキングスタンダードの再校正は元の光度標準電球群によって行う。この階層化により上位校正機関に校正を依頼する頻度を減らすことができる。しかしその分だけ多くの光度標準電球が必要となる。また、光度標準電球は使用に伴う消耗等によっていずれ使用不能となるが、その時期を正確に予測することは困難である。そのため校正事業を間断なく遂行するためには予備の光度標準電球が必要となる。

2.2 照度応答度標準受光器を用いた代替システムの提案

図4に校正事業者における光度・照度校正の、照度応

答度標準受光器を用いた代替システム案を示す。ここでは光度標準電球が担っていた光の発生と値の維持という二つの役割を二つの機器に分割して割り当てる。すなわち、光の発生は仲介用電球に任せ、測光量に関する値の維持は照度応答度標準受光器に任せさせる。それによって、図4においても図2で光度標準電球を用いていたのと同様に“値の分かった光の場”を実現することができる。ここで、標準照度応答度標準受光器が持つ値は照度応答度 $([A/lx]$ または $[V/lx]$) である。従って、照度応答度標準受光器からの出力を i とし、照度応答度を s_v とすれば、照度応答度標準受光器の基準面における照度 E_v は

$$E_v = \frac{i}{s_v} \quad (3)$$

と求められる。求めたい校正量は校正器物である照度計の基準面における照度値、または校正器物である電球の光度値である。照度計基準面における照度は、仲介用電球が作る照度が照度応答度標準受光器によって式(3)のように与えられるので、照度応答度標準受光器と照度計を同じ位置に設置することにより知ることができる。電球の光度値を校正する場合には仲介用電球の必要はなく、照度応答度標準受光器を用いて直接電球に値を付けることができる。その際、電球フィラメントと照度応答度標準受光器の基準面との距離を r とすれば、電球の光度値 I_d は

$$I_d = r^2 \frac{i}{s_v} \quad (4)$$

と求めることができる。このように、電球および照度計の校正を照度応答度標準受光器の照度応答度 s_v に基づいて校正することが可能である。

2.3 NMIJにおける照度応答度標準受光器への値付け

照度応答度標準受光器を使用した校正事業を実現するためには照度応答度の値付けられた受光器が必要となる。そのため、NMIJにおいて照度応答度標準受光器への値付けを行う。その方法としては、NMIJの保持している光度標準電球を用いた値付け手法を採用することを計画して

いる。ここでは、光度値の分かった標準電球から受光器の照度応答度に値付けを行う。その際には、距離の逆二乗則が土台となる。光度標準電球の光度値を I_v 、距離を r 、受光器の出力を i 、照度応答度を s_v とすると、それらの関係は式(4)と同様に以下のように書ける。

$$I_v = r^2 \frac{i}{s_v} \quad (5)$$

それぞれの値に対して、実際には計測体系に即した不確かさの評価が必要である²⁾。以下それらの不確かさ要因について説明する。まず、光度値について考える。光度標準電球は光度値 I_R が値付けられているが、実際に受光器に照射される光度はいくつかの要因で I_R からずれる。まず、電球の消耗により実際の光度は I_R より変化する。電球の使用時間を Δt 、係数を α とすると、その補正は $-\alpha \Delta t$ となる。また、電球の光度は光の放射方向に依存する。 I_R は電球の正面方向に対して値付けられているので、電球使用時のフィラメント設置の角度ずれを θ 、 ϕ とすると、光度値の補正は $-k w(\theta)$ 、 $-h w(\phi)$ となる(文献2)を参照)。ただし、ここでは光度の角度依存性が $\cos^k(\theta)$ 、 $\cos^h(\phi)$ と表わされると仮定している。また、電球の光度値はある点灯電圧 V_R に対して値付けられているが、実際の点灯時の電圧のずれが放射される光度に影響する。実際の点灯電圧の読取値を V_j とし、電圧計の校正係数を c_j とすれば、その補正係数は $(c_j V_j / V_R)^{m_j}$ となる。ここで m_j は点灯電圧に対する光度値補正の指数である。これらを合わせると、電球に値付けられた光度値 I_R に対して、受光器方向に実際に照射される光度は以下の様になる。

$$I_v = I_R \left(\frac{c_j V_j}{V_R} \right)^{m_j} (1 - \alpha \Delta t - h w(\phi) - k w(\theta)) \quad (6)$$

次に光電流 i に対する補正を考える。受光器の応答度は光源が基準面に垂直な方向に置かれた状態で値付けられるが、もし受光器の向きがずれた場合にはその分を考慮する必要がある。受光器と光軸方向との角度ずれを ε とすると本来の電流値 i は読み取られた電流 i_r に対して $\cos \varepsilon$ に対応する補正を加える必要がある。また、光電流の読み値および受光器の応答度は環境温度に影響を受ける。環境温度の設定値からのずれを ΔT とし、電流計測と受光器応答度の温度変化の係数をそれぞれ c_a 、 c_p とすると、その分の補正はそれぞれ $-c_a \Delta T$ 、 $-c_p \Delta T$ となる。また、受光器には迷光が入り込むため、電流値から迷光の寄与を引かなければならない。迷光成分の補正を $-c_{\text{stray}}$ とする。それら光電流に対する補正を全て合わせると、

表2 照度応答度標準受光器における主要な不確かさ(予想)

項目	不確かさへの寄与 % ($k=1$)
標準電球	0.32
温度変化(± 1 K)	0.06
経年変化(0.1%/年)	0.06
光源-受光器距離 (1 m \pm 1 mm)	0.12

$$i = i_r (1 - c_{\text{stray}} - c_a \Delta T - c_p \Delta T + w(\varepsilon)) \quad (7)$$

となる。次に、距離の項であるが、これは距離の校正精度の部分と電球および受光器の設置ずれの部分に分ける。

$$r = d + \Delta d_L + \Delta d_p \quad (8)$$

Δd_L 、 Δd_p は電球フィラメントと受光器の設置ずれであり、期待値はゼロである。 d は電球フィラメントと受光器の距離である。光度、光電流、距離に対するそれぞれの補正(6)、(7)、(8)を(5)に代入すると、受光器に値付けられる照度応答度と使用する電球に値付けられた光度値、読み取られた光電流との関係は以下の様になる。

$$s_v = (d + \Delta d_L + \Delta d_p)^2 \frac{i_r (1 - c_{\text{stray}} - c_a \Delta T - c_p \Delta T + w(\varepsilon))}{I_R \left(\frac{c_j V_j}{V_R} \right)^{m_j} (1 - \alpha \Delta t - h w(\phi) - k w(\theta))} \quad (9)$$

校正においてはそれぞれの変数に対して値と不確かさを求め、それらを基に出力量 s_v に対する値と不確かさを求めることになる。ただし、ここで値付けられた s_v はその時点における値である。ある程度の期間において値の信頼性を確保するためには、その期間における経時変化の評価が必要となる。

受光器評価における主要な不確かさ成分の予想値(相対標準不確かさ、 $k=1$)を表2に示す。光度標準電球自体が持つ不確かさが最も大きく、0.32%である。その他の成分はそれより小さいため、トータルでは0.4%程度で供給が可能であると予想される。また、事業者における校正の不確かさへの影響に関しては、標準の階層管理の簡略化などによって、トータルでは不確かさを低減できる可能性もある。これらの不確かさについて、いくつかの照度応答度標準受光器候補を選定して評価を行う予定である。

2.4 仲介用電球と色補正

照度応答度標準受光器を用いた校正において照度計等を校正する際には、光源として仲介用電球を使用する。仲介用電球に求められる条件としては、校正に要する時

間内においてその光度と分光分布が安定であることが求められる。仲介用電球の候補としてはハロゲン電球が考えられるが、その際には電球の分布温度に注意が必要である。照度応答度の定義(3.1小節を参照)によれば、照度応答度は使用する光源から入射する放射束の分光分布に依存する。従って、校正時の光源と計測対象の光源の分光分布が異なる場合には不確かさが発生する。これは受光器の分光応答度が $V(\lambda)$ に完全には一致しないことに起因する問題である。通常の照度校正時には光源の分布温度は2856 Kで行う。一方ハロゲン電球の分布温度は、通常の点灯では3200 K程度となる。ハロゲン電球をより分布温度の低い2856 Kで使用するには、定格より低い点灯電圧での点灯を行うことになる。仲介用電球としての適否を決定するためには、そのような点灯条件における発光特性の安定性や電球寿命への影響などを検討する必要がある。また、仲介用電球は光度標準電球ほど正確に分布温度を調整することが困難であることも考えられる。従って、実際の使用において分布温度のずれがどの程度まで許容されるかを知ることが重要である。その指標を与えるのが色補正係数である(色補正係数に関しては参考文献3)を参照)。受光器の応答度が $V(\lambda)$ からずれるほど、分布温度2856 Kに対する照度応答度とその他の分布温度に対する照度応答度のずれが大きくなるため、受光器の特性ごとの評価が必要である。例えば、図5はNMIJで使用している $f_1' = 3.2\%$ を持つ $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度に対する色補正係数を示したものである(f_1' については付録を参照)。光源の分布温度2500 K~3200 Kにおいて、色補正係数の1からのずれが-0.08%~0.04%程度となっている。実際に使用可能な仲介用電球に関しては、色補正の問題に加えて安定性などの課題も検討した上で、今後選定していくことになる。

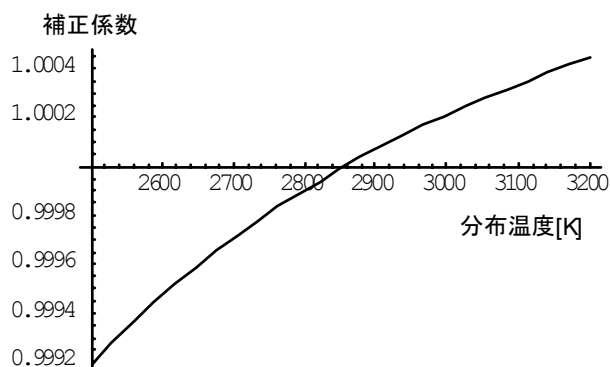


図5 色補正係数の分布温度依存性

3. NMIJにおける光度具現の改善

3.1 光度の定義と具現方法

光度具現用受光器の改良方向を示すために、ここでまず光度の定義と具現方法の現状について説明する。現在測光量の基本となる単位は光度単位カンデラである。1カンデラの大きさは、1979年の第16回国際度量衡総会における採択により以下のように定義されている。「カンデラは、周波数 540×10^{12} Hzの単色放射を放出し、所定方向におけるその放射強度が $(1/683)$ W/srである光源の、その方向における光度である」。測光量は、対応する放射量に標準分光視感効率 $V(\lambda)$ と呼ばれる波長ごとの重み付けをすることで得られる。 $V(\lambda)$ は人間の目の明所視における2度視野の分光感度を標準化したもので、国際照明委員会(CIE)により定められている。 $V(\lambda)$ のグラフを図6に示す。つまり、1カンデラの大きさは上の定義で与えられ、その他の波長に対しては $V(\lambda)$ を掛けることでカンデラに換算することになる。従って、ある測光量 X_v は対応する分光放射量 $X_{e,\lambda}(\lambda)$ と $V(\lambda)$ を用いて以下のように求められる。

$$X_v = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

ここで積分範囲は $\lambda_1 = 360$ nm, $\lambda_2 = 830$ nmである。ここで K_m は最大視感度と呼ばれる量であり、683 lm/Wと与えられている。例えば、照度 E_v [lx]は分光放射照度 $E_{e,\lambda}(\lambda)$ [W/m² nm]を用いて以下のように表わされる。

$$E_v = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$V(\lambda)$ のグラフから分かるように、同じ放射束[W]を持つ光を人間が見た場合、中心波長555 nmの光はより明るく、裾部分の波長(例えば450 nm, 700 nmなど)の光はより暗く感じられる。

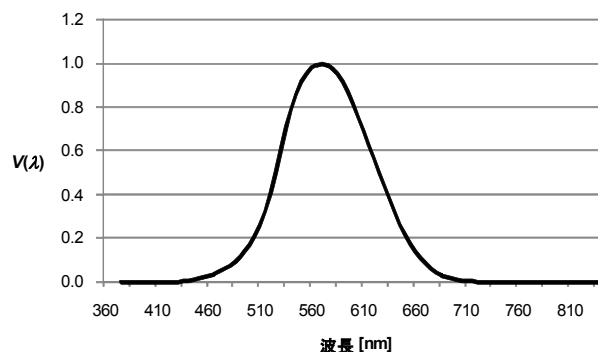


図6 分光視感効率 $V(\lambda)$

ある光源の光度値（カンデラ）はそれを計測する受光器の照度応答度に基づいて決定される。ここで、測定に用いる受光器が照度応答度 s_v [A/lx] を持っているとする。すると、受光器への入射照度 E_v [lx] と誘起される光電流 i [A]、および s_v の関係は式(3)で与えられる。一方、入射する光の分光放射束を $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ [W/nm]、受光器の開口面積を A [m²] とすると、分光放射照度は $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)/A$ と与えられる。従って、照度 E_v [lx] はその定義式(11)から以下のように与えられる。

$$E_v = \frac{K_m}{A} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

また、実際の受光器は $s_e(\lambda)$ [A/W] の分光応答度を持つ。従って、入射する分光放射束によって誘起される光電流は、各波長ごとの寄与を足し合わせることで

$$i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) s_e(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

となる。 E_v と i を照度応答度の式(5)に代入して整理すると、以下の様に照度応答度を表す式が得られる。

$$s_v = \frac{A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) s_e(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (14)$$

受光器の分光応答度 $s_e(\lambda)$ が $V(\lambda)$ に近いほど測光用としては高品質な受光器となる。式(14)によって受光器の照度応答度を求め、さらに受光器に生じた光電流を計測することによって、 $E_v = i/s_v$ から受光器の位置における照度を求めることができる。求められた照度と逆二乗則から、式(5)によって光源の光度が得られる。

これらのことから、受光器の照度応答度に基づいて光度を具現するには以下のことが必要であることが分かる。

- 1) 受光器の絶対分光応答度 $s_e(\lambda)$ [A/W] を決定する。
- 2) 光源の相対分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ を決定する。
- 3) 受光器の開口面積 A [m²] を決定する。
- 4) 受光器からの光電流 i [A] を計測する。
- 5) 光源と受光器との距離 r [m] を計測する。ただし、光源の分光分布は上の式によって s_v [A/lx] の算出に用いるので、相対分布でよい。このうち、光度具現用受光器の評価において最も重要なのは1)の絶対分光応答度の値付けである。

3.2 $V(\lambda)$ 受光器の構成

前小節に示したように、光度は受光器の分光応答度に基づいて具現される。ここでは光度具現に用いられる受光器の構成について述べる。 $V(\lambda)$ 曲線に近似した分光応答度を持つ受光器を $V(\lambda)$ 受光器と呼ぶ。光度具現には図7に示すような $V(\lambda)$ 受光器を用いる。その構成は、

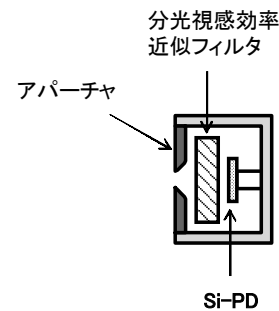


図7 光度具現用受光器

アパーチャ、Siフォトダイオード、電流電圧変換増幅器、および $V(\lambda)$ 補正フィルタである。

3.2.1 アパーチャ

照度とは単位面積当たりの光束である。受光器に入射する光束を照度に変換するには、光束を受光器の開口面積で割る必要がある。アパーチャは受光器の開口面積を決定し、照度と入射光束を対応づける物である。具現用の受光器においては、光束と照度の変換を行うため、アパーチャ面積は正確に求められる必要がある。アパーチャの開口面積を計測する手法としては、レーザビームスキャン法⁴⁾、接触法⁵⁾、顕微鏡法^{6),7)}があり、NMIJでは比較的小型の装置で実現可能なレーザビームスキャン法が用いられている。各々の相対標準不確かさ ($k=1$) は、直径3 mmに対して 1.6×10^{-4} (レーザビームスキャン法)、直径2.6 mmに対して 2.5×10^{-5} (顕微鏡法) などが得られている。

3.2.2 Siフォトダイオード

定常光を計測する通常の測光においては、光検出器として主にPN接合のSiフォトダイオードが用いられる。定常光の計測では高速応答は必要なく、直線性やノイズの少なさが重要であるためである。測光用の光検出器として求められる性能は、可視光に感度を持つこと、紫外および赤外領域に感度を持たないこと、ノイズとドリフトが小さいこと、直線性が良いこと、受光面の一様性が良いこと、経年変化が少ないこと、などである。これに対してSiフォトダイオードは可視領域で良好な特性を示す。ただし、空間的一様性、直線性、経年変化などは波長に依存する。精密測光用Siフォトダイオードは190 nm-1100 nm程度まで感度を持つが、紫外域や赤外域に近づくとも一様性や長期的安定性は低下する傾向がある⁸⁾⁻¹⁰⁾。これに対して、複数個のフォトダイオードを組み合わせ、フォトダイオード表面からの反射光を次のフォトダイオード

で受け取るような配置とすることで外部量子効率をほぼ100%とし、偏光依存性や空間的ばらつきなどを低減することができる。このような光トラップ型の検出器が光度具現用の光検出器としていくつかの国家標準機関で用いられている¹¹⁾⁻¹³⁾。

3.2.3 電流電圧変換増幅器

フォトダイオードからの出力である光電流はその直後の電流電圧変換増幅器によって電圧に変換されて計測される。高精度な計測のためには、使用するフォトダイオードのインピーダンスに合った電流電圧変換増幅器を使用しなければならない^{14),15)}。例えば、単体のSiフォトダイオードとトラップ型のSiフォトダイオードではインピーダンスが異なるため、組み合わせによって電流電圧変換増幅器の増幅率を適切に評価することが求められる。

3.2.4 $V(\lambda)$ 補正フィルタ

Siフォトダイオードなどの光検出器の分光応答度は分光視感効率 $V(\lambda)$ とは一致しない。そこで、用いられる光検出器と組み合わせられた時に分光応答度が $V(\lambda)$ に近づくように、適切な分光透過率を持った光学フィルタを光検出器の前面に設置する。これが $V(\lambda)$ 補正フィルタである。この $V(\lambda)$ 補正フィルタは多くの場合いくつかの色ガラスフィルタを組み合わせることで実現される³⁾。色ガラスフィルタを用いた $V(\lambda)$ フィルタには二種類ある。受光面内で空間的に一様な分光透過率を持つフルフィルタ型と、モザイク状に組み合わせた色ガラスにより空間的に非一様な分光透過率を持たせたモザイクフィルタ型である。図6に示したように、 $V(\lambda)$ の分布は波長555 nmにピークを持つ山形の形状を持つ。このような分光応答度分布を実現するために、紫外・赤外カットフィルタ、短波長側に向かって緩やかな遮断特性を持つフィルタ、長波長側に向かって緩やかな遮断特性を持つフィルタの組み合わせなどが用いられる。しかし、実際に $V(\lambda)$ に良好に一致する物を作成するのは簡単ではなく、研磨による光学フィルタの厚さ調整やモザイク型のフィルタによって一緻度を高めることなどが行われる。モザイク型では受光面内の分光透過率を部分的に調整することで、受光面上で平均した際の分光応答度を $V(\lambda)$ により近づけることができる。分光応答度の $V(\lambda)$ への一緻度は f_1' 値で表わされる。フルフィルタ型の $V(\lambda)$ 受光器においては6-8枚の色ガラスフィルタを用いて $f_1' < 1.5\%$ 程度が実現されている¹⁶⁾。モザイク型では $f_1' < 0.8\%$ が達成可能である。しかし、モザイク型では入射光の側に空間的一様性を仮定しているため、使用の際には注意が必要であ

る。例えば、分光器から出射される光の空間分布は一様とは限らないので、それが不確かさの要因となり得る。

3.3 NMIJにおける絶対分光応答度の値付けと課題

3.1小節において光度の定義について述べた。受光器への値付けにおいて現状で最も大きな課題となるのは絶対分光応答度の値付けである。ここではその絶対分光応答度の値付けについて述べる。

極低温放射計による絶対分光応答度 s_e [A/W]の決定：受光器の絶対分光応答度を求めるために、まず光検出器であるSiフォトダイオードの絶対分光応答度の測定が行われる。ここで、ある単色レーザの放射束を $\Phi_{\lambda 1}$ [W]とし、それが入射した際のSiフォトダイオードの光電流を $i_{PD,1}$ [A]とすると、その波長における応答度[A/W]は以下の様になる。

$$s_{PD}(\lambda_1) = \frac{i_{PD,1}}{\Phi_{\lambda 1}} \quad (15)$$

ここで、レーザの入射放射束は極低温放射計による電力置換法によって決定される。極低温放射計は、レーザ入射による受光キャビティの温度上昇と、ヒータ電力[W]による受光キャビティの温度上昇を置換することにより、入射レーザの放射束[W]を求める装置である。この測定をいくつかのレーザを用いて複数の波長で行えば、各レーザ波長点における離散的な分光応答度を求めることができる。

モデル計算によるSiフォトダイオードの応答度の内外挿：Siフォトダイオードの分光応答度は可視域においては単純な関数で記述できることが分かっている。レーザ波長点に対して得られた離散的な応答度をモデル式に最少二乗フィッティングすることで、Siフォトダイオードの絶対分光応答度 $s_{PD}(\lambda)$ [A/W]を得ることができる。

受光器分光応答度の決定：Siフォトダイオードの絶対分光応答度 $s_{PD}(\lambda)$ [A/W]が明らかになれば、分光応答度校正装置によって各波長における受光器の分光応答度を校正することができる。分光応答度校正装置は、可視

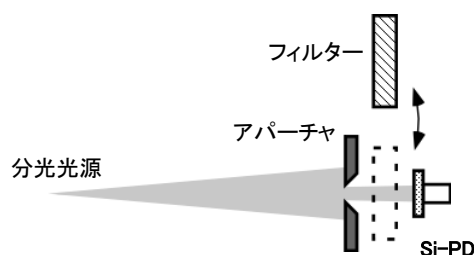


図8 光度具現用受光器への分光応答度の値付け

領域ではハロゲン電球を光源とし、二重回折格子型の分光器によって単色光を取り出すことができる。そこで図8のように、光路上に精密開口 A を設置し、その背後にSiフォトダイオードを配置した状態で、 $V(\lambda)$ フィルタの有無によって出力を調べる。フィルタのない場合の出力を i_{PD} [A] とすれば、以下の式により各波長における分光放射束 $\Phi(\lambda)$ [W] が求められる。

$$\Phi(\lambda) = \frac{i_{PD}}{s_{PD}(\lambda)} \quad (16)$$

次に、 $V(\lambda)$ フィルタを取り付けて同じ光を測定する。その際の出力を i_v [A] とすれば、下記の式により受光器の分光応答度 $s_v(\lambda)$ [A/W] を決定することができる。

$$s_v(\lambda) = \frac{i_v}{\Phi(\lambda)} \quad (17)$$

要するに、理想的には入射放射束の分かった光源を使用し、受光器からの出力を測定することで分光応答度を求めることができる。しかしながら、現実には様々な理由によって理想的な条件から外れる。不確かさの評価においてはそれら非理想的な効果による影響をそれぞれ見積もることが求められる。考えられる非理想的な成分としては、受光器の温度揺らぎ、受光面の非一様性、応答の非直線性、紫外光・赤外光の影響、入射発散角依存性、偏光依存性、光源の非単色性、波長ずれ、などがある。表3に、現状の上位光度標準電球に対する光度校正の不確かさバジェットを示す。不確かさの主要な成分は $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度の不確かさである。光度校正の不確かさ改善のためには、上述の各非理想性の影響を評価するための、より詳細な手順を確立することが課題となる。

3.4 具現用受光器の改良

ここでは具現用受光器の改良方向について述べる。MIKES¹³⁾、UME¹²⁾では光度具現用受光器に対してペルチェ素子および温度センサを用いた温度制御を行っている。これによって温度設定による不確かさを 1.7×10^{-4} (MIKES)、

表3 現状の光度校正における不確かさバジェット

要因	相対標準 不確かさ %
極低温放射計によるフォトダイオードの分光応答度校正	0.05
フォトダイオードの分光応答度をもとにした分光視感効率近似受光器の照度応答度校正	0.2
分光視感効率近似受光器・光度標準電球間距離	0.05
室温変動による分光視感効率近似受光器の分光応答度変化	0.1
光度標準電球の設置再現性	0.1
相対合成標準不確かさ	0.25

1.4×10^{-4} (UME) と低く抑えることに成功している。NMIJにおいても同様の改良を具現用受光器に加えることで、現状では0.1%の寄与がある温度変動による不確かさを1/5程度に低減できると考えられる。市販の $V(\lambda)$ 受光器では温度変化に対して照度応答度の変化が0.1%/K程度であることが知られている。ここから類推すると、受光器に対して ± 0.1 K程度の温度安定化を行えば十分な効果が得られると推測される。また、それらの標準機関では具現用受光器の光検出器としてトラップ型のSiフォトダイオードを用いることでフォトダイオードの空間的非一様性による不確かさへの寄与を 5×10^{-5} に抑えている。単体のSiフォトダイオードではその応答度に空間的非一様性があり、波長555 nmにおいては0.1%程度¹⁷⁾、波長800 nmにおいては1%程度⁹⁾のばらつきとなる。NMIJにおいても光度具現用受光器にトラップ型のSiフォトダイオードを導入することで、応答度の一様性を向上でき、また、フォトダイオードからの反射光の低減によりフィルタとの相互反射の影響を抑制することができるなど、不確かさの低減には有効であると考えられる。受光器の評価技術の詳細化と併せてこれらの改良を施すことにより、不確かさバジェットにおける照度応答度の不確かさを減少させることを目指す。

4. 波及効果

受光器の校正技術が確立されれば、それは照度応答度の評価にとどまらず、様々な発展方向が考えられる。それらは例えば、測色計、閃光計測、高強度光計測、紫外放射(照度)計、フィルタラジオメータによる分光放射照度標準、などである。それら受光器の応用法について概観する。

高強度光計測：光度標準電球によって達成できる照度は数千lx程度であるが、日中の太陽光の照度は10万lxに達する。このような高照度の計測は、受光器の直線性を評価することで信頼性の確保が行われる。例えば、NISTでは温度制御された受光器を用いて、10万lxまでの校正サービスを行っている¹⁸⁾。ここではソーラシミュレータ用キセノンアークランプを光源として、それに色ガラスフィルタを組み合わせることで10万lxで分布温度2856 Kを持つ光源を実現している。ポイントは、熱的に絶縁されたボックスに $V(\lambda)$ フィルタおよびSiフォトダイオードを設置し、それらを温度制御することで高照度照射による加熱の影響を抑制している点である。これにより10万lxまで0.3%以内の直線性を確保している。このような高照度においても温度制御可能な標準受光器の導入により

高照度計測における不確かさの低減が期待される。

閃光計測：明滅光、閃光などの非定常光は衝突防止灯や誘導灯、ハザードランプなどとして、航空、船舶、自動車産業において広く使用されている。それらの発光が光度値、時間間隔などの適切な仕様を満たしているかを知るためには、物理的な計測によって測られる必要がある。そのため、NISTでは閃光計測用受光器に対する露光量[lx s]の校正サービスを行っている¹⁹⁾。ここでは $V(\lambda)$ 受光器と電流積分型の計測回路の組み合わせによる閃光用標準受光器を用いて、閃光による露光量の評価を行っている。そして、キセノンフラッシュランプを光源として、閃光用標準受光器との比較測定によって市販の閃光測光器の校正を行うことが可能となっている。

測色器：受光器においてフィルタの分光透過率を適切に合わせることができれば、三刺激値測色器の標準を作成することが可能となる。そのような標準測色器を用いることで、標準光源や分光放射計を使用することなく一般測色器の校正を行うことが可能である。その際に使用される仲介用光源としては、実際の測定対象（ハロゲン電球やLCDディスプレイ）をモデル化した光源を使用することで、校正の不確かさを低減することができる¹⁹⁾。NISTにおいては三刺激値測色器を用いた計測により illuminant A光源に対する色度の不確かさ0.0004 ($k=2$)の標準測色器が実現されている²⁰⁾。

分光放射照度：光度具現用受光器のように、極低温放射計に基づいて高精度に絶対分光応答度の値付けられた受光器を用いて高温黒体炉の温度を直接決定することができる。そして、放射温度の分かった高温黒体炉と比較測定を行うことで分光放射照度標準電球に値を付けることが可能である。NISTではこの手法を用いることで分光放射照度の値付けに要する中間ステップの段数を減らし、不確かさの低減に成功している²¹⁾。

紫外放射計：受光器の作成・評価技術を紫外域に拡張できれば、紫外放射に対する標準受光器の実現につながる。文献²²⁾では $V(\lambda)$ フィルタとSiフォトダイオードの代わりに紫外域の干渉フィルタとGaAsPフォトダイオードを用いた紫外放射計を開発している。波長260 nmから380 nmの範囲において、バンド幅約10 nmの干渉フィルタを用いた応答度[A/W]が値付けられている。それによって重水素ランプなどの紫外域校正が可能である。また、使用可能な干渉フィルタの中心波長の数を増やすことができれば、200 nmから400 nmの全域を含む校正が可能となる。

5. まとめ

測光標準供給体制の維持・強化のために受光器の応答度に基づく標準の整備・開発を行っている。第1段階では特定二次標準器として照度応答度標準受光器の供給を行う体制を確立する。そこでは、NMIJの持つ光度標準電球から照度応答度標準受光器への値付けを行う。第2段階では光度具現用受光器の改良と評価手法の見直しを行う。それによりNMIJにおける光度具現の不確かさを改善する。受光器の応答度に基づく標準の校正技術が確立されれば、その成果は大強度光計測、閃光計測、測色、紫外光計測などへの応用に発展していくことが期待される。

謝辞

本稿を作成するにあたり、以下の方々に多大なるご助力を頂いた。ここに感謝の意を表す。光放射計測科・齊藤一朗科長には本稿の作成全般に渡り多大な助言を頂いた。光放射標準研究室・市野善朗主任研究員には本稿の構成に関して多くの有益な指摘を頂いた。光放射標準研究室・神門賢二研究員には測光計測技法の初歩から丁寧な指導を頂いた。これらの方々の忌憚ない意見、コメントによって、本稿をより一層光産業および測光標準の発展に有益なものとすることができたと思ふ。

付録 分光視感効率 $V(\lambda)$ からの外れ f'_1

実際の $V(\lambda)$ 受光器においてはその分光応答度は $V(\lambda)$ 曲線から外れる。その外れの度合を規格化してパーセント表示したものが f'_1 である。 f'_1 は以下の式で定義されている。

$$f'_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |s'(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) d\lambda} \times 100$$

ここで、 $s'(\lambda)$ は以下の式で定義される。

$$s'(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, T_A) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, T_A) s(\lambda) d\lambda} s(\lambda)$$

ここで、 $s(\lambda)$ は受光器の分光応答度、 $P(\lambda, T_A)$ は illuminant A光源におけるプランク放射の分光分布である。

参考文献

- 1) G. P. Eppeldauer, C. C. Miller, and Y. Ohno: New photometer standards for low uncertainty illuminance scale realization, Proceedings of the 26th Session of the CIE (Beijing, China, 4-11 July 2007) D2-99-D2-102.
- 2) G. Sauter: Determination of measurement uncertainties in photometry, CIE TC 2-43.
- 3) 照明学会 (編): 光の計測マニュアル (日本理工出版会, 1990).
- 4) A. Lassila, P. Toivanen, and E. Ikonen: An optical method for direct determination of the radiometric aperture area at high accuracy, Meas. Sci. Technol., 8 (1997) 973-977.
- 5) J. E. Martin, et al.: Determination and comparisons of aperture areas using geometric and radiometric techniques, Metrologia, 35 (1998) 461-464.
- 6) J. B. Fowler, R. D. Saunders, and A. C. Parr: Summary of high-accuracy aperture-area measurement capabilities at the NIST, Metrologia, 37 (2000) 621-623.
- 7) J. Fowler, and M. Litorja: Geometric area measurements of circular apertures for radiometry at NIST, Metrologia, 40 (2003) S9-S12.
- 8) R. Korde, et al.: Present status of radiometric quality silicon photodiodes, Metrologia, 40 (2003) S145-S149.
- 9) T. C. Larason, and S. S. Bruce: Spatial uniformity of responsivity for silicon, gallium nitride, germanium, and indium gallium arsenide photodiodes, Metrologia, 35 (1998) 491-496.
- 10) F. Lei, and J. Fischer: Characterization of photodiodes in the UV and visible spectral region based on cryogenic radiometry, Metrologia, 30 (1993) 297-303.
- 11) G. Obein, L. Gonzalez-Galvan, and J. Bastie: A new realization of the candela at the LNE-INM/CNAM, Proceedings of the 26th Session of the CIE (Beijing, China, 4-11 July 2007) D2-192-D2-195.
- 12) F. Samedov, M. Durak, and Ö. Bazkır: Filter-radiometer-based realization of candela and establishment of photometric scale at UME, Opt. Laser. Eng., 43 (2005) 1252-1266.
- 13) P. Toivanen, et al.: Realization of the unit of luminous intensity at the HUT, Metrologia, 37 (2000) 131-140.
- 14) G. P. Eppeldauer, and D. C. Lynch: Opto-mechanical and electronic design of a tunnel-trap Si radiometer, J. Res. Natl. Inst. Stan., 105 (2000) 813-828.
- 15) 向井誠二: 光強度変調の影響を受けにくい高安定なフォトダイオード用電流電圧変換回路, 産総研計量標準報告, 4 (2006) 253-259.
- 16) G. P. Eppeldauer, and M. Pácz: Design and characterization of a photometer-colorimeter standard, Applied Optics, 43 (2004) 2621-2631.
- 17) C. L. Cromer, et al.: The NIST detector-based luminous intensity scale, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 101 (1996) 109-132.
- 18) Y. Ohno, and M. Navarro: New photometric calibration programmes at the National Institute of Standards and Technology, Metrologia, 35 (1998) 317-321.
- 19) Y. Ohno: Physical measurement of flashing lights - now and then, Proc. CIE Symposium '02 (Veszprem, Hungary, 2002) 31-36.
- 20) G. P. Eppeldauer, et al.: Realization and application of a detector-based tristimulus color scale at the National Institute of Standards and Technology, USA, Proc. AIC'05 (Granada, Spain, 9-13 May 2005) 693-696.
- 21) H. W. Yoon, C. E. Gibson, and P. Y. Barnes: Realization of the National Institute of Standards and Technology detector-based spectral irradiance scale, Applied Optics, 41 (2002) 5879-5890.
- 22) I. Abu-Kassem, J. Bastie, and F. Lepoutre: Standards of spectral irradiance in the ultraviolet range based on filter radiometers calibrated against a cryogenic radiometer, Proceedings of the 25th Session of the CIE (San Diego, USA, 25 June - 2 July 2003) D2-22-D2-25.