

光度・照度標準を取り巻く課題と将来展望に関する調査研究

二宮博樹*

(2024年1月31日受理)

A survey on current issues and future prospects for luminous intensity and illuminance standards

NINOMIYA Hiroki

Abstract

Photometric quantities, which are obtained by weighting the visual response of the human eye to the optical radiation, are classified as one of the psychophysical quantities. This paper reviews the realization method and its traceability chain of photometric units, such as candela (cd) and lux (lx). Additionally, several issues in providing the luminous intensity scale to the industry are summarized in terms of the global phase-out of incandescent light bulbs and the recent proposal of a novel spectral luminous efficiency function. Based on these findings, future prospects for the sustainable operation of the luminous intensity and illuminance standards are discussed.

1. はじめに

1.1 背景

何らかの物理量を測定することは、定められた基準に対する倍数を明らかにすることと同義であり、この基準は常に正しく、世界共通でなければならない。物理量の単位において、いわゆる共通言語は国際単位系 (SI)¹⁾ であり、学術論文誌はもとより、あらゆる場面において SI に則した表記で物理量を議論することが求められている。本調査研究で扱う光度・照度標準は、光に関する物理量の基準となる知的基盤の一つである。人間のもつ五感のうち、最も情報を与えるものは視覚とされていることから、光を定量化することは元来から望まれていた技術である。光度の単位：カンデラ (記号は cd) は、SI 基本単位の一つに定められており、このことが光度標準の重要性を物語っている。

人間の目を通じて感じる光を定量化した物理量 (測光量) の計測は、光源や照明環境の明るさ、ディスプレイの評価技術にとどまらず、医療診断や作業環境の照度基

* 物理計測標準研究部門 光放射標準研究グループ

準評価など、そのニーズは多岐に渡っている。このため、測光標準は光関連業界全体の支柱の一つであり、将来に渡って安定に運用を継続するためにも、標準における技術開発は極めて重要な位置づけとなる。

1.2 目的

本調査研究では、測光量の中でも光度と照度に焦点を当て、これらの単位 (カンデラやルクス) の具現方法や標準の供給体制の理解、また、光度標準が直面している現状の問題を調査し、標準の将来運用に向けた課題を論じることを目的としている。まず、測光量に関する基礎事項を整理し、光度 (照度) 単位の具現方法とそのトレーサビリティ、校正を通じた産業界への標準供給の現状についてまとめる。次に、仲介用標準器や照度基準器の運用に関する問題、また、固体照明 (LED や有機 EL など) 全盛時代の到来とともに提起された新しい分光視感効率に関する問題を含め、測光標準の持続可能な安定運用に向けた懸案事項を整理する。最後に、これらの問題を踏まえて、解決に向けた技術開発課題について議論する。

2. 光度・照度標準

2.1 測光量の概要と導出方法

本節では、測光標準の基礎として、測光量の定義その導出方法について述べる。

2.1.1 放射量と測光量

測光量とは、放射量に対して人間の視覚応答による重み付けを施した物理量であり、心理物理量に分類される。放射量は、自由空間を伝搬する光放射のエネルギーに対して、時間的、空間的な量を組み合わせて構築された量であり、最も基本となるのは、単位時間当たり放射エネルギーを表す放射束（単位：W = J s⁻¹）である。その他の放射量は、放射束と幾何学的な量（面積や立体角など）、および時間の組み合わせで定義される²⁾。ただし、本稿で扱う放射量は、多くの波長成分を有する光放射であり、ある微小波長幅に含まれる放射量をその波長幅で除することにより、分光密度（いわゆる分光放射量）として考える必要がある。したがって、分光放射量は単位波長（通常は、nm）当たりの放射量を意味する。例えば、単位立体角当たりの放射束である放射強度（単位：W sr⁻¹）に対応する分光放射量は分光放射強度（単位：W sr⁻¹ nm⁻¹）であり、これに視覚応答を重み付けして積分した測光量が光度（単位：cd = lm sr⁻¹）である。

以上のように、（分光）放射量と測光量には1対1の対応関係があり、（分光）放射量に視覚応答を加味することで、測光量への変換が可能である。表1に、代表的な放射量と測光量の関係をまとめる。

2.1.2 光度およびカンデラの定義

光度は、人間の視覚を加味した光の強さを表す量であり、その単位であるカンデラ（記号：cd）は、SI基本単位の一つである。図1に示すように、点光源からある方向に発する光について、単位立体角あたりに含まれる光束を表す量が光度である。したがって、光度 I_v 、光束

Φ_v 、立体角 Ω は以下の式で結び付けられる。

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1)$$

ここで、光束は放射束（単位：W）に対応する測光量であり、その単位をルーメン（記号：lm）で表す。また、立体角の単位がステラジアン（記号：sr）であることから、 $cd = lm sr^{-1}$ の関係が成立する。さらに、単位面積に入射する光束量（ $lm m^{-2}$ ）を照度と呼び、単位をルクス（記号：lx）で表す。

現在のSIにおけるカンデラは、2018年11月の第26回国際度量衡総会（CGPM）の決議に基づき、以下のよう定義されている³⁾。

カンデラ（記号はcd）は、所定の方向における光度のSI単位であり、周波数 540×10^{12} Hzの単色放射の視感効果度 K_{cd} を単位 $lm W^{-1}$ ($cd sr W^{-1}$ あるいは $cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3$ に等しい) で表したときに、その数値を683と定めることによって定義される。ここで、キログラム、メートルおよび秒は h 、 c および $\Delta\nu_{Cs}$ に関連して定義される。

ここで、 h はプランク定数、 c は真空中の光の速さ、 $\Delta\nu_{Cs}$ はセシウム133原子の外乱を受けていない基底状態の超微細構造遷移周波数である。

上述の定義定数 K_{cd} は、2.1.1節で述べた、放射量を測光量に変換するための量に対応する。周波数 540×10^{12} Hzの単色放射は、波長に換算すると、標準大気（気温15°C、気圧101325 Paで、二酸化炭素の体積組成が0.045%である乾燥空気⁴⁾）中で $\lambda_{cd} = 555.017$ nm である。したがって、カンデラの定義は、標準大気中にて1 Wの放射束をもつ波長 λ_{cd} の単色放射の光束を683 lmとすることと同義である。

表1 代表的な放射量（分光放射量）とそれに対応する測光量の名称と量記号、および単位。量記号における下付きの e は energetic、v は visible を表す。

放射量			分光放射量			測光量		
名称	量記号	単位	名称	量記号	単位	名称	量記号	単位
放射束	Φ_e	W	分光放射束	$\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$	W nm ⁻¹	光束	Φ_v	lm
放射強度	I_e	W sr ⁻¹	分光放射強度	$I_{e,\lambda}(\lambda)$	W sr ⁻¹ nm ⁻¹	光度	I_v	cd
放射照度	E_e	W m ⁻²	分光放射照度	$E_{e,\lambda}(\lambda)$	W m ⁻² nm ⁻¹	照度	E_v	lx

2.1.3 分光視感効率

前節で述べたように、カンデラは周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に対してのみ定義されており、これにより特定の放射量と測光量の関係が厳密に結び付けられている。しかしながら、測光で扱う光放射のほとんどは、様々な波長および強度の成分を含んだ光であり、その分布を波長の関数である分光放射量として考慮する必要がある。さらに、その分光放射量に対して、光に対する人間の目の応答を波長ごとに重み付けする必要がある。目の分光応答度は個人によって様々であるとともに、同一人物でも年齢などの条件によっては応答度が変化すると考えられる。そこで、できるだけ多くの人の代表として使える目の分光応答度が相対値で規定されており、これを分光視感効率と呼ぶ。輝度レベルや視野に応じて分光応答度は異なるため、それに対応するよう複数の分光視感効率が規定されている(表2)。

分光視感効率は一般に波長 λ の関数であり、明所視、暗所視、薄明視と呼ばれる3種の視覚状態に対して定義されている。これらの視覚状態は、観測者の置かれる輝度レベルに応じて分類される(後述)。明所視は、十分に明るい輝度レベル (5 cd m^{-2} 以上)での視覚であり、この場合では人間の網膜上の視細胞にある錐体と桿体の二種のうち、錐体が視覚に寄与する。明所視については、さらに視野角に応じて、2度視野と10度視野の分光視感効率が定義されている。2度視野とは、観測者が50 cmの距離で直径1.7 cmの試料を観察する場合に対応する。以上4種の分光視感効率のうち、図2に明所視、

暗所視での曲線を示す。 $V(\lambda)$ は、明所視標準分光視感効率⁵⁾と呼ばれ、一般の測光において広く用いられている。また、 $V(\lambda)$ は、1924年に国際照明委員会(CIE)が勧告した値に基づいており、その後、内外挿や平滑化を経て、1972年の国際度量衡委員会(CIPM)で採択された。図2に示したように、 $V(\lambda)$ は、 $\lambda = 555 \text{ nm}$ において最大であり、この値を1として他の波長の値が決められている。すなわち、明所視において人間は緑色の光に最も大きな感度を有する。

一方、視細胞の桿体が機能する暗所視(輝度 0.005 cd m^{-2} 以下)での分光視感効率は暗所視標準分光視感効率 $V'(\lambda)$ ⁵⁾ と呼ばれる。 $V'(\lambda)$ (図2点線)は波長507 nmで最大となり、光に対する目の最大感度は青色域へと移行することを意味する。 $V(\lambda)$ に引き続き、 $V'(\lambda)$ は1976年のCIPMで採択された。 $V'(\lambda)$ を用いることで、暗所視での測光量の導出が可能であり、実際に暗所視対応の機能を有する計測器も存在する。

その他の条件に対応する値として、明所視10度視野の分光視感効率 $V_{10}(\lambda)$ ⁶⁾ (図2破線)が挙げられる。この関数は、より広い視野角を考慮する必要のあるディスプレイの色制御技術などの研究開発用途で用いられることがある。さらに、明所視と暗所視の中間の状態に対応する視覚として薄明視がある。この場合、視覚には錐体と桿体の両方が寄与しており、明るい場合には錐体、暗い場合には桿体の機能が支配的となる。CIEは、薄明視における分光視感効率 ($V_{mes,m}(\lambda)$) を以下の式によって導出することを提案している⁷⁾。

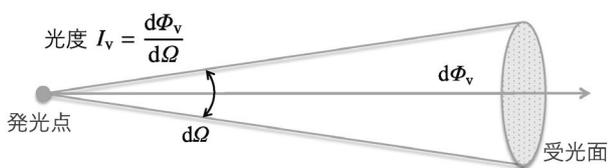


図1 光度・照度・光束の概念図

表2 規定されている主な分光視感効率。暗所視の分光視感効率 $V'(\lambda)$ は、視覚に桿体が寄与する周辺視を扱うため、視野角は規定されていない。

視覚状態	2度視野	10度視野
明所視	$V(\lambda)$	$V_{10}(\lambda)$
暗所視	$V'(\lambda)$ (視野角は未規定)	
薄明視	$V_{mes,m}(\lambda)$ ($V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$ の線形結合)	

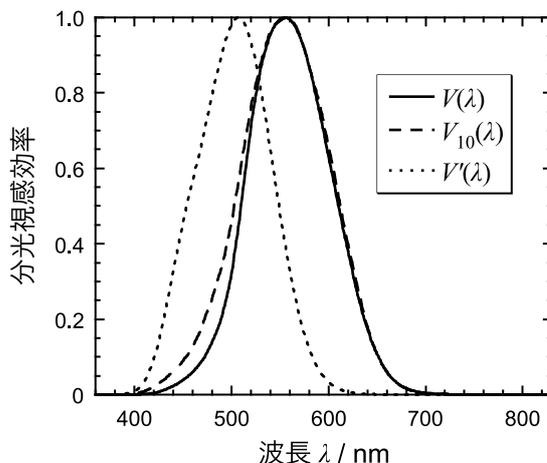


図2 分光視感効率。各曲線は、最大値が1となるように定義されている。 $V(\lambda)$ は明所視2度視野、 $V_{10}(\lambda)$ が明所視10度視野、 $V'(\lambda)$ は暗所視における分光視感効率を表す。

$$V_{mes;m}(\lambda) = \frac{1}{M(m)} \{mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda)\} \quad (2)$$

ここで、 m は順応係数で、 $M(m)$ は $V_{mes;m}(\lambda)$ を 1 に正規化するための関数である。式 (2) で表されるように、薄明視分光視感効率の最大波長は、 m の値 (0 から 1) に応じて 555 nm から 507 nm の間で推移する。

2.1.4 CIE 物理測光システム

2.1.3 節にて述べた分光視感効率は、人間の視覚応答を加味した物理量である測光量を定量化する上で必須の概念である。 $V(\lambda)$ 等の関数に基づいて放射量から測光量を導出する手法は、CIE 物理測光システム⁸⁾において国際的に規格化されている。まず明所視の場合には、ある分光放射量 $Q_{e,\lambda}(\lambda)$ に対し、それに対応する測光量を $Q_{v,x}$ とすると、 $Q_{v,x}$ は次式で与えられる。

$$Q_{v,x} = K_m \int_{\lambda} Q_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_x(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

ここで、 $V_x(\lambda)$ は、選択する分光視感効率である。波長積分の範囲は、分光視感効率の定義されている波長範囲の下限と上限を用いればよく、通常は 360 nm から 830 nm の範囲である⁵⁾。 K_m は最大視感効果度と呼ばれる定数であり、通常、 $K_m \approx K_{cd} = 683 \text{ lm W}^{-1}$ として差し支えない。例えば、本稿で主眼とする光度の場合、分光放射強度 (単位: $\text{W sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$) を $I_{e,\lambda}(\lambda)$ とすると、光度 I_v は $V(\lambda)$ を用いて、

$$I_v = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} I_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

により求めることができる。

次に、暗所視の場合の測光量 ($Q'_{v,x}$) の導出には、式 (3) の $V_x(\lambda)$ を $V'(\lambda)$ とすることによって、次式から求められる。

$$Q'_{v,x} = K'_m \int_{\lambda} Q_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5)$$

ここで、 K'_m は暗所視における最大視感効果度であり、 $K'_m = 1700 \text{ lm W}^{-1}$ として計算することができる。なお、 $V'(\lambda)$ の値は、波長 380 nm から 780 nm の範囲で与えられている⁵⁾。

2.2 光度・照度標準の実現

本節では、光度の単位であるカンデラの具現方法を述べ、その上位標準を含めたトレーサビリティ体系を概観

する。

2.2.1 光度・照度の実際の測定

カンデラの定義では、単位の具現方法は明示されていないため、原理的に可能な方法から最適な手法を選択する必要がある。現在、世界各国で主流となっているのは、光度標準電球によって光度具現用受光器 (以下、 $V(\lambda)$ 受光器と呼ぶ) に与えられる照度を、所定の測光距離で測定する手法である。図 3 に、この方法に基づいて光度を具現するための測定系の一例を示す。 $V(\lambda)$ 受光器は、照度応答度 R_v (単位: A lx^{-1}) が値付けられており、開口面積 A の精密アパーチャ、光検出素子のシリコンフォトダイオード (以下、Si PD と表記) と組み合わせることで $V(\lambda)$ に近似した応答を得るための光学フィルタ ($V(\lambda)$ フィルタ) から構成される。光度標準電球によって与えられるアパーチャ上での照度を E_v 、発光点から基準受光面までの距離 (測光距離) を d とすると、光度 I_v との間には以下の関係が成立する。

$$I_v = d^2 \cdot E_v \quad (6)$$

すなわち、光度と照度の間に距離の逆二乗則が成り立つ。一方、 $V(\lambda)$ 受光器の出力電流を i_0 とすると、照度は $E_v = i_0 / R_v$ で求められるため、式 (6) は、

$$I_v = d^2 \cdot E_v = \frac{d^2 \cdot i_0}{R_v} \quad (7)$$

となる。ここで、照度応答度 R_v は、 A 、 K_m 、 $V(\lambda)$ 、受光器の分光応答度 $s(\lambda)$ (単位: A W^{-1})、および測定対象となる光源の相対分光分布 $\Phi_{rel,\lambda}(\lambda)$ (分光放射束の相対値) を用いて、以下の式で表される。

$$R_v = \frac{i_0}{E_v} = \frac{A \int_0^{\infty} \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (8)$$

以上の測定と式 (7) により、カンデラの定義に沿った

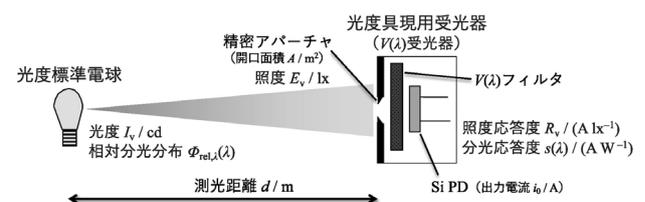


図 3 光度 (照度) の実現方法の一例

単位が具現されている。産業技術総合研究所（以下、産総研）においても、本手法をもとに光度・照度標準が設定され⁹⁾、国際比較を通じた標準値の国際整合性の確認が定期的に行われている。

2.2.2 トレーサビリティと光度測定の不確かさ

NMIJ における光度単位のトレーサビリティを図4に示す。現在、測光・放射標準体系の最上位である一次標準器として、世界的に主流なのは電力置換型極低温放射計¹⁰⁾である。極低温放射計は、極低温に保持された受光キャビティへのレーザー光入射による温度上昇と、受光キャビティに取り付けたヒータへの直流電流印加による温度上昇を比較することにより、入射レーザーの放射束(W)を決定する装置である。したがって、放射束の校正は電気標準にトレーサブルであり、 $V(\lambda)$ 受光器に対する不確かさの小さい分光応答度の値付けに繋がる。

上述の原理で決定した放射束既知のレーザーをSi PDなどの光検出素子に入射させて出力電流を測定することで、Si PDの分光応答度($A W^{-1}$)を求めることができる。この測定をいくつかのレーザー波長に対して行うことで、その波長点のみでの絶対分光応答度を決定し、その波長範囲を内外挿によって可視域全体に拡張する。

続いて、分光応答度既知のSi PDは、 $V(\lambda)$ フィルタおよび精密アパーチャと組み付けられ、 $V(\lambda)$ 受光器が

構成される。単色平行光用いた分光応答度比較測定により、 $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度を決定し、式(8)を用いることで、 $V(\lambda)$ 受光器の照度応答度($A lx^{-1}$)を計算する。このようにして、2.2.1節で述べた逆二乗則(式(7))を用いて、光度標準電球の光度値を決定することができる。実際の運用においては、光度標準電球と $V(\lambda)$ 受光器を用いて常用参照標準(ワーキングスタンダード、以下WS)である電球の光度を校正し、そのWSを用いてDUT(電球や受光器など)の校正を行っている。

各国の国家計量標準機関(NMI)について、光度の校正・測定能力(CMC)を表3にまとめる。相対標準不確かさは、最小でも0.2%程度であり、不確かさへの寄与が大きい要素として、 $V(\lambda)$ 受光器への R_v の値付け、測定環境の温度ゆらぎによる R_v の変化、光度標準電球のアライメント、また、 $V(\lambda)$ 受光器の長期安定性(R_v のドリフト)などが挙げられる^{11),12)}。以上のように、光度具現の不確かさは最小でも0.1%のオーダーであり、この大きさは上述した測定方法で可能な限界値に近いとされている。これは、 $V(\lambda)$ 受光器のさらなる特性向上(照度応答度の不確かさの大幅な改善)が容易でないことが原因として考えられている⁹⁾。とりわけ、 $V(\lambda)$ 受光器の長期安定性に関しては、 $V(\lambda)$ フィルタの特性変化が主要な要因と考えられ、この起源として周囲環境(温度、湿度、塵芥、紫外線など)によるガラスの経年劣化が挙げられる。 $V(\lambda)$ フィルタは、Si PDの応答度を加味しつつ、その分光透過率を分光視感効率に近似させる必要があるため、数種類の色ガラスフィルタの組み合わせを最適化することで作製されるのが一般的である。このため、複数のガラス同士を貼り合わせる際の硬化樹脂の劣化の影響を受けることも指摘されている。

2.2.3 国外のNMIにおける光度標準

NMIJ 以外の主要国NMIに関しても、極低温放射計で値付けされたSi PD(機関によって1素子型あるいはトラップ型)の分光応答度に基づいて $V(\lambda)$ 受光

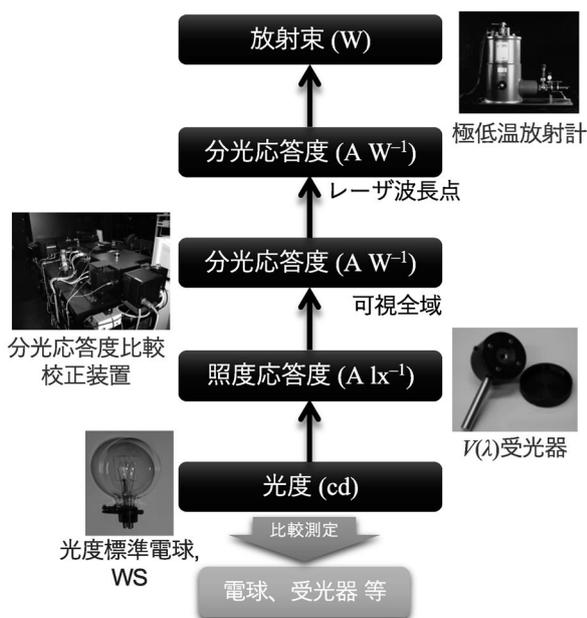


図4 NMIJにおける光度(単位: cd)のトレーサビリティ

表3 各NMIにおける光度の校正・測定能力。各値は、BIPMの提供するKCDB(Key Comparison DataBase)¹³⁾より引用

国	NMI	相対標準不確かさ (%)
中国	NIM	0.25
アメリカ	NIST	0.25
日本	NMIJ	0.32
ドイツ	PTB	0.20

器の照度応答度が決定され、光度単位が具現されている¹⁴⁾⁻¹⁷⁾。米国のNIST (National Institute of Standards and Technology) は、光度具現に用いる $V(\lambda)$ 受光器の改良に取り組んでおり、その結果、光度に対応する照度応答度の値付けの不確かさを大きく低減させることに成功している¹⁸⁾。この詳細は、3.1.4 節にて述べる。

ドイツのPTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) においては、極低温放射計に基づいて値付けされたトラップ型 Si PD に対して、精密アパーチャと波長可変レーザを用いて、分光応答度 ($A W^{-1}$) を分光放射照度応答度 ($A/(W m^{-2} nm^{-1})$) に変換している。その次のステップとして、 $V(\lambda)$ 受光器を用いて分光放射照度応答度が照度応答度に変換され、光度測定が行われている¹²⁾。さらに最近では、上述の極低温放射計による Si PD への分光応答度の値付けから、 $V(\lambda)$ 受光器の照度応答度決定までのステップをモジュール化し、仲介標準器として1つのトラップ型光検出器を用いることで、光度具現の不確かさの改善に取り組んでいる¹⁹⁾。具体的には、6素子の Si PD から構成されるトラップ型検出器を受光器のコアとして、入射部に交換可能な3種類のキャップ(極低温放射計用アパーチャ、放射照度用精密アパーチャ、標準電球測定用 $V(\lambda)$ フィルタ付きアパーチャ)が装着できるモジュール型検出器を開発している。この検出器は、PTB の有する波長可変レーザをベースにした測光用の校正システム (TULIP²⁰⁾) を用いて分光放射照度応答度が校正され、照度応答度が値付けられる。照度応答度の相対標準不確かさは、0.088 % と報告されている²¹⁾。

3. 光度・照度標準を取り巻く問題とその対応

前章まで、光放射にともなう放射量と、光度をはじめとする測光量の関係について述べ、その基準となる測光標準の基盤技術を概説した。この章では、光度・照度標準における現状の問題(主として2つ)について、その背景と問題解決に向けて今後達成すべき研究開発課題を議論する。

3.1 問題1：白熱型標準電球の枯渇

3.1.1 白熱型電球の製造・供給に関する動向

第一の問題は、固体照明への置き換えに伴う白熱型標準電球の枯渇である。光源の発光効率、単位 $lm W^{-1}$ で与えられ、この値が大きいほど、少ない電力で高い発光量(全光束)を得ることができる。白熱型電球の発光効率は $10 lm W^{-1}$ 程度であり、ハロゲン電球についても、 $20 lm W^{-1}$ から $30 lm W^{-1}$ にとどまっており、電力の多

くは熱として失われる。21世紀における世界的な省エネルギー志向の高まりを背景に、高発光効率で長寿命な固体照明の技術革新²²⁾⁻²⁴⁾と急速な普及を受け、特に白熱型電球に関しては、各国で製造や輸出入、販売について規制がかかり始めている。EU (欧州連合) 諸国においては、欧州委員会 (EC) 規則²⁵⁾に基づき、2009年から2016年にかけて、消費電力に応じて段階的に家庭用白熱型電球およびハロゲン電球の製造や流通が禁止された。2019年には、新たなEU規則²⁶⁾が承認され、発光効率が $100 lm W^{-1}$ を大きく下回る電球は廃止されているのが現状である。米国においても、長年にわたり段階的な廃止が進められてきたが、2023年8月1日以降、一般電球の発光効率の下限を $45 lm W^{-1}$ とすることを米国エネルギー省 (DOE) が決定し²⁷⁾、事実上、一般向けの白熱型電球やハロゲン電球の販売は禁止となった。中国では、2012年10月から、消費電力100W以上の白熱型電球の輸入と販売を禁止し、2016年10月には、消費電力15W以上の白熱型電球まで禁止を拡大することを発表している²⁸⁾。

日本においては、白熱電球の製造や輸出入について法的には禁止されていないものの、エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)に基づくトップランナー制度²⁹⁾が導入されている。これは、対象となる機器の製造業者や輸入事業者に対して、エネルギー消費効率の目標を示して達成を促すとともに、エネルギー消費効率の表示を求める制度である。該当機器で商品化されている製品のうち、エネルギー消費効率が最も優れているもの(トップランナー)を省エネ基準の目標とすることで、エネルギーの消費を抑えることを目的に実施されている。「照明器具」および「電球」については、トップランナー制度の対象となっており、2019年4月より施工された省エネ法の改正政令において、その対象範囲が拡大された。とりわけ、電球に関しては、従来、LEDランプのみが対象であったが、新たに蛍光灯と白熱型電球が追加され、電球全体として規制対象となった。昨今の世界情勢を鑑みると、白熱型電球の材料調達の問題も含め、国内メーカーが白熱型電球のトップランナー方式に参入する可能性は低いと考えられ、LEDランプへの置き換えが益々促進されることは必至である。

一方、放電灯の一種である蛍光灯は、 $100 lm W^{-1}$ 強の発光効率も実現可能であるが、一般に水銀を含むため、廃棄処理の際の環境汚染リスクなどに注意を要する。実際に、2023年10月から11月にかけて開催された「水銀に関する水俣条約第5回締約国会議」³⁰⁾においては、水銀を含有する製品の規制の見直しや、規制対象となる

水銀汚染廃棄物のしきい値などに関する議論が行われ、直管蛍光灯の製造・輸出入を2027年末までに禁止することが決定された³¹⁾。なお、電球型蛍光灯に関しては、2025年末での製造・輸出入の禁止がすでに決まっている。

3.1.2 測光標準の運用体系

エネルギー効率が比較的低い白熱型電球やハロゲン電球の取引禁止を背景に、あらゆる照明器具はLEDなどの固体照明への置き換えが世界的に進んでいる。一般照明に限って言えば、近い将来、従来技術に基づく電球は完全に姿を消す可能性も考えられる。しかしながら、これら光源の技術開発や性能評価に欠かせない測光標準の体系は、白熱型電球に大きく依存しているのが現状である。

図5は、日本国内における測光標準の供給体制である。産総研の保有する特定標準器のうち、現在運用されている光度・照度標準に関連が最も深いのは、分光視感効率近似受光器 ($V(\lambda)$ 受光器) である。特定標準器から光度が値付けされたコイル M 字型光度標準電球³²⁾を WS (ワーキングスタンダード) として、日本電気計器検定所 (JEMIC) の有する特定副標準器 (白熱型電球) の光度が校正される。Japan Calibration Service System (JCSS) と呼ばれる計量法に基づく計量法トレーサビリティ制度³³⁾に則し、jcoss 校正 (特定標準器や特定副標準器による校正) を介して登録事業者の有する特定二次標準器 (白熱型電球) の光度が校正される。各登録事業者は、特定二次標準器の光度を基準として、それぞれの WS (白

熱型電球) に値を移し、それをを用いて白熱型電球や蛍光灯ランプ、照度計などの計測器の校正 (JCSS 校正) を行う。なお、ユーザが事業者に依頼する校正サービスは、大きくは JCSS 校正と一般校正に分類される。JCSS 校正は、国家標準までの計量トレーサビリティが確保されていることが保証され、また、その校正値は CIPM 相互承認取決め (CIPM MRA)³⁴⁾ に基づいて国際的に受け入れ可能となる。

以上のように、光度・照度標準は白熱型の標準電球への値付けを介して産業界へ供給されている。前節で述べた白熱型電球に関する動向は、一般用の電球に限らず、標準電球についても例外ではない。標準電球の主要メーカー (東芝、OSRAM、Polaron など) は、2010 年以降相次いで、測光用の白熱型標準電球の製造中止を発表している。白熱型電球はその原理上、LED などと比較すると寿命は短く、点灯時間の蓄積によっていずれ不点となる。しかし、すでに光度標準電球の新規購入は不可であるため、現状のストックを階層に分けて管理し、上位標準の消耗を可能な限り減らすことでしか電球を維持する術がないのが現状である。特に、校正サービスの件数が多い事業者によっては標準電球の在庫が逼迫し、これまで通りの校正事業を継続できなくなるおそれもある。また、緻密に設計された標準電球の設置 (フィラメントのアライメントなど) や計測技術の伝承も課題であり、校正の不確かさを損ねることのない、より平易な校正体系の構築も望まれている。

3.1.3 標準電球枯渇への対応と今後の展望

測光・放射測定分野において、将来的に白熱型標準電球やハロゲン標準電球が利用不可となることへの対応として、第一に、LED を標準光源として用いた校正体系の整備が挙げられる。この取り組みは、特に欧州を中心として盛んであり、CIPM MRA に基づいた欧州地域計量組織 (EURAMET) においては、NEWSTAND³⁵⁾ と呼ばれるプロジェクトが2023年6月より進行している。これは、白熱型電球等に依存してきた分光放射量測定器の校正を、検出器に基づいた校正に移行させるために、必要な代替光源の探索や、分光放射計の仲介標準器としての利用を検討し、そのガイドラインを提供することを目的としている。また、日本も含め、標準 LED 光源の開発に関する研究も世界的に行われ³⁶⁾⁻⁴⁰⁾、LED ベースの標準光源への移行が志向されている。一方、現状の測光標準は、プランクの放射束に基づいた黒体近似光源を念頭に構築されたものであり、白熱型電球などの従来光源に対しては、技術の蓄積が十分にある。しかし、LED

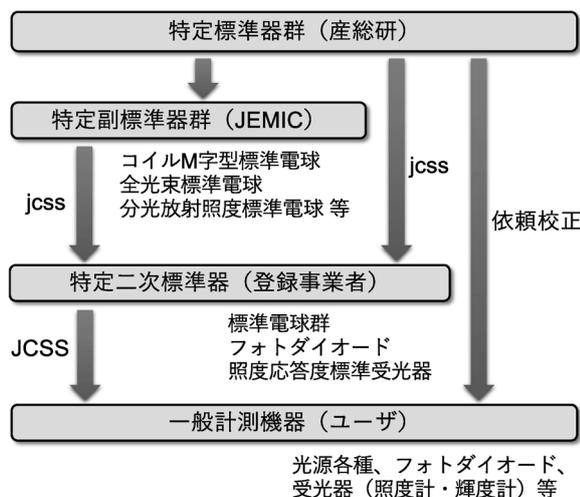


図5 日本における測光標準の供給体制の概要

の分光分布は黒体放射スペクトルとは大きく異なるため、従来の測光技術をそのまま適用することは難しい。また、分光分布の差異以外にも、LED ベースの標準光源の技術課題は多岐にわたり（温度特性、配光特性、光源のサイズや形状など）⁴¹⁾、計測技術の開発や体系化を含めてさらなる研究開発が必要である。

第二の取り組みは、受光器の応答度に基づいた光度・照度標準の確立である。現状の光度測定の特レーサビリティにおいて、光度標準電球は、光源としての役割と、光度値を維持する役割の両方を担っている。このような光度標準電球への高い依存度を低減するための措置として、光源としての役割を適当な仲介用電球に任せ、光度値の維持は受光器（標準受光器）に担わせる体系⁴²⁾が整備されつつある。図6は、標準受光器を用いた校正方法の一例である。受光器は「照度応答度標準受光器」として運用し、これは、照度応答度 $R_v / (A \text{ lx}^{-1})$ が値付けられた受光器を意味する。電球が DUT である場合、DUT から光を標準受光器で測定すれば、式(7)に示した距離の逆二乗則により、電球の光度を直接求めることができる。一方、DUT が照度計などの計測器の場合は、仲介用電球を光源として機能させ、その光による出力を標準受光器と比較することにより、DUT の照度応答度を校正することができる。

以上の原理のもと、白熱型電球を標準器とした校正体系に加え、産総研は照度応答度の jcss 校正サービスの提供を開始している。産総研における運用では、標準受光器に対する照度応答度の値付けは、光度標準電球を用いて行われているが、標準電球の jcss 校正が3年に1度の頻度で行われるのに対し、照度応答度の jcss 校正は1年ごとに行われている。これは、標準電球の光度値を維持する安定性や点灯再現性と比較すると、標準受光器の安定性には依然として課題があるためである。

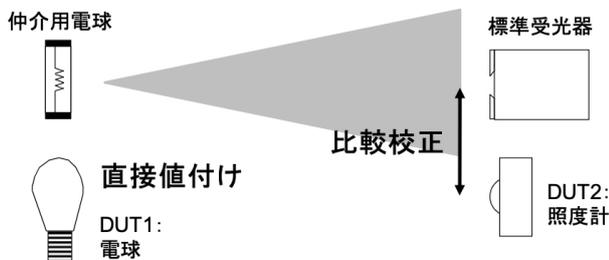


図6 標準受光器を用いた DUT (電球および計測器) の校正体系。図は文献⁴²⁾より修正引用

一方で、日本では計量法に基づき、照度計は特定計量器に指定され、法令で定められた様々な作業環境の照度基準を確保するために用いられている。照度測定の結果を取引や証明に用いる場合には、所定の検定に合格した照度計を用いなければならない。図7に示すように、照度計の検定を行うための照度基準器は、現状の体制では標準電球が担っており、その照度基準器が規定された要件を満たしていることを確認するための基準器検査（5年に1度）も標準電球（特定副標準器）によって行うことが規定されている。すなわち標準電球の枯渇問題は、法定計量分野においても解決すべき喫緊の課題となっている。ここで、照度基準器として受光器を追加したとすると、先に述べた安定性の課題から受光器の基準器検査は現状より高頻度、例えば1年ごとに行わなければならない。結果として特定副標準器（電球）の負荷が増大することになる。

以上、事業者における標準電球の運用に関する状況を踏まえると、今後は、一例として、図8に示すような

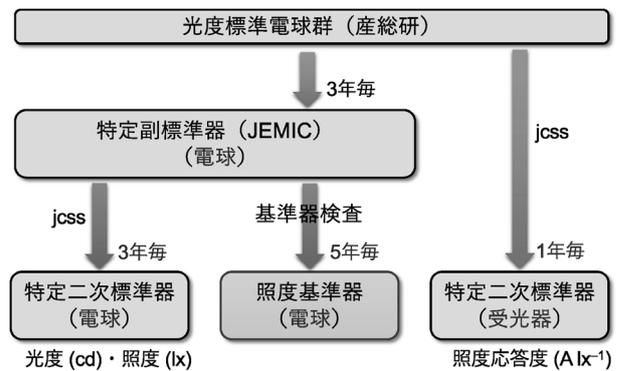


図7 光度・照度校正と照度基準器検査の体制（現行）

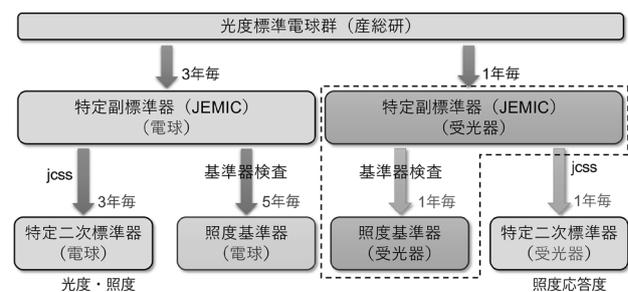


図8 今後必要とされる光度・照度校正と照度基準器検査の体制の一例（図中破線枠）

体制を整備する必要があると考えられる。本案は、照度基準器として受光器を追加するとともに、特定副標準器としても、同様に照度応答度標準受光器を追加するという体制である。このような体制とすることで、照度基準器の検査を図6の方法に基づき、受光器同士で行うことができ、特定副標準器（電球）の使用頻度を増大させることなく運用が可能となる。ただし、標準受光器の候補とする受光器の適切な選定、適当な照度や分布温度を有する仲介用電球の探索など、今後達成すべき課題は残されている。産総研では、タンゲステンフィラメントを有する市販の白熱型電球およびハロゲンランプに関する市場調査を行い、それらの出力再現性を調査し始めている⁴³⁾。

3.1.4 測光受光器の長期安定化技術の開発

前節までに述べた白熱型標準電球枯渇の問題の解決策の一つとして、照度応答度標準受光器に基づく光度・照度校正の体系整備は急務と考えられる。これまで、測光標準が白熱型標準電球への値付けを介して供給されてきたのは、標準電球のもつ高い点灯安定性や測光量の再現性によるところが大きい。現状では、標準電球と同等の長期安定性を受光器に確保させるのは技術的に難しい。これは、標準受光器となり得る $V(\lambda)$ 受光器が周囲の温度や湿度、埃などの環境条件に影響を受ける際、経年変化要因が必ずしも自明ではなく、その対策を十分に講じることができないためである。

NISTは、計8台の $V(\lambda)$ 受光器について、照度応答度の相対経年変化をモニターした結果を報告している⁴⁴⁾。最初の1年で相対変化は0.1%弱と小さいが、その後2年で0.4%変化している。なお、これらの変化はほとんどの場合、負の相対変化であり、ガラスフィルタ($V(\lambda)$ フィルタ)に表面膜が付着したことによる透過率の低下が原因とされている。本文献では、照度応答度の経年変化の平均値は、年あたり0.11%であると報告されている。産総研で運用している $V(\lambda)$ 受光器についても、年あたり0.1%以上の相対変化が観測されているが、経験上、受光器によってはさらに大きく相対変化する場合や、予期せぬ値飛びが生じる場合もあることが明らかとなっている。

最新の研究において、NISTは $V(\lambda)$ 受光器の改良を行い、同時に光度測定の不確かさの低減を報告している⁴⁵⁾。注目される改良は、 $V(\lambda)$ フィルタとSi PDを内蔵する受光ヘッド部が、1気圧の乾燥窒素ガスで封止されている点である。また、外部温度コントローラが付属しており、受光器の応答性のばらつきを低減するため、

光学チャンバーは25℃に温度制御されている。この改良型 $V(\lambda)$ 受光器について、照度応答度の経時変化は年あたり0.05%またはそれ以下まで改善され、相対標準不確かさは、従来の約0.20%から0.10%まで減少することが報告されている。

以上のように、 $V(\lambda)$ 受光器の経年変化要因の一つは、受光部($V(\lambda)$ フィルタとSi PD)の湿気や埃に起因する周囲環境によるものである可能性が指摘されているが、露光量に対する受光部各材料の光学特性変化については、十分に明らかになっていない。そこで、今後は $V(\lambda)$ 受光器の長期安定化技術を開発課題として、特に $V(\lambda)$ フィルタおよびSi PDの劣化特性の評価を進める。産総研では、これまでに $V(\lambda)$ 受光器の開発を行っており、将来的には、光度具現用受光器としての利用も検討している。開発した $V(\lambda)$ 受光器に内蔵する $V(\lambda)$ フィルタは、市販の色ガラスフィルタを組み合わせることによって、Si PDと合わせて $V(\lambda)$ に近似した分光感度が実現されている。色ガラスフィルタを用いて $V(\lambda)$ を実現するには、赤外放射をカットする防熱フィルタ、短波長に向かって緩やかな遮断特性をもつ色温度変換フィルタ、長波長側を比較的緩やかに遮断するフィルタ、これら3種のフィルタが最低限必要である²⁾。また、 $V(\lambda)$ の釣鐘型の形状を模擬するため、緑色域の波長を透過するバンドパスフィルタが用いられることもある⁴⁵⁾。それぞれのフィルタは光学特性が異なるため、温度や湿度による劣化特性も異なることが推測される。さらに、紫外線や放射線がガラスに照射されると、可視域や近紫外域に吸収が生じ、ガラスが着色することがある。このように、ガラスが紫外光に晒されて着色・変色する現象を一般にソラリゼーションと呼ぶ⁴⁶⁾。ガラスのソラリゼーションは、紫外放射のエネルギーによって、含まれる2種の多原子化イオン間で電子の移動が生じることが起源として考えられている。したがって今後の研究課題として、 $V(\lambda)$ 受光器の長期安定化に資する技術(劣化防止や補正機能の組み込み)が挙げられる。経年変化要因の特定のため、まずは受光部の紫外線暴露による $V(\lambda)$ 受光器の劣化特性評価が必要と考えられる。具体的には、 $V(\lambda)$ の実現に必要な各種色ガラスフィルタやSi PDに対し、放射露光量の管理された様々な波長の光照射を行う。照射後のフィルタやSi PDについて、分光透過率や分光応答度の変化を照射前と比較することで、フィルタやSi PDの種類別に劣化特性を検証する。

一方、色ガラスフィルタを組み合わせる $V(\lambda)$ フィルタを作製する方法のみならず、近年では、ガラス基板上に誘電体多層膜を蒸着した干渉フィルタ型の $V(\lambda)$ 近似

フィルタが市販されており、中には分光透過率をカスタマイズできる製品も存在する。このように、干渉フィルタは厚みを大きく変化させることなく、成膜条件によって分光特性を調整できる利点があるが、一般には専門業者に作製を依頼する必要があるが、費用が高額となる。また、干渉フィルタは高い透過率を維持したまま $V(\lambda)$ への近似が可能となるが、光の入射角によって分光透過率が変化しやすいため、フィルタと Si PD の光学設計に注意が必要である。干渉フィルタ型の $V(\lambda)$ フィルタに関しても、その劣化特性に関するデータの蓄積が十分ではなく、色ガラスフィルタと並行して湿気暴露や光照射などの加速試験を実施する必要があると考えられる。

3.2 問題2：新しい分光視感効率の提唱

3.2.1 標準分光視感効率 $V(\lambda)$ が抱える課題

光度・照度標準を取り巻く第二の問題は、新しい分光視感効率の提起とその置き換えに関わる問題である。2.1.3 節および 2.1.4 節で述べたように、測光量を議論するに当たっては、光に対する人間の目の分光感度を表す量である分光視感効率の考慮が不可欠であり、特に $V(\lambda)$ は、長年にわたり測光標準の根幹となる概念として認知され運用されてきた。しかし、約 100 年前の古いデータに基づく $V(\lambda)$ は、必ずしも人間の視覚の代表とはならないとして、いくつかの技術的な問題が古くから指摘されている。具体的には、短波長域の過小評価と視野角の問題である。前者に関しては、色覚細胞の分光応答特性の研究などにに基づき、 $V(\lambda)$ における波長 460 nm より短

い領域 (380 nm から 459 nm) の値を見直した分光視感効率 $V_M(\lambda)$ が 1990 年に提唱された⁴⁷⁾。図 9 は、 $V(\lambda)$ と $V_M(\lambda)$ の比較である。459 nm 以下のデータについて $V_M(\lambda)$ が上回っており、分光視感効率の過小評価が改善されているが、 $V_M(\lambda)$ の利用は研究用途にとどまっているのが現状である。後者の問題 (視野角) については、明所視標準分光視感効率 $V(\lambda)$ が前提としている 2 度の視野角が、人間の一般的な視野 (見込む角度) としては小さいことを指摘するものである。これに対処する手段として、10 度視野での分光視感効率 $V_{10}(\lambda)$ (図 2 破線) が補足的に規定されている⁸⁾。

3.2.2 錐体分光感度に基づく分光視感効率

$V(\lambda)$ における上述の問題の解決に向け、人間の網膜上の視細胞における錐体の分光感度評価に基づき、科学的に信頼できる厳密な視覚表現システムの研究が行われてきた⁴⁸⁾⁻⁵¹⁾。その集大成として、CIE は 2 つの技術レポート (CIE 170-1:2006⁵²⁾ および CIE 170-2:2015⁵³⁾) を出版し、錐体分光感度の値とそれに基づく新たな等色関数と分光視感効率を提唱した。

CIE 170-1:2006 においては、10 度の視野について、角膜平面において測定された長波長感受性錐体 (L 錐体)、中波長感受性錐体 (M 錐体)、および短波長感受性錐体 (S 錐体) の分光感度関数、いわゆる “cone fundamentals” の値が与えられている。これらの関数を中間透光体 (角膜直後から網膜直前までの総称) と黄斑色素の吸収について補正し、錐体視覚色素の光学濃度を考慮することで、これらの色素の吸光度関数が導かれている。また、2 度視野の視覚色素を加味することで、この吸光度関数から 2 度視野の錐体分光感度の値が与えられている。同様の手順により、1 度から 10 度までの任意の視野角について錐体分光感度の値を求めることができるだけでなく、年齢の関数として水晶体の吸収を考慮することで、錐体分光感度の年齢による影響も取り入れられることが示されている。

CIE 170-2:2015 では、CIE 170-1:2006 の報告に基づいて、分光視感効率および色度図の形で、ユーザに実用的な測光・測色ツールを提供することを目的としている。Sharpe らの方法⁵⁴⁾に基づき、L 錐体および M 錐体の錐体基本関数の線形結合により、新しい分光視感効率を定義した。この関数は、2 度視野と 10 度視野の条件下における数値データで与えられており、それぞれ $V_F(\lambda)$ および $V_{F,10}(\lambda)$ と表す。 $V_F(\lambda)$ と $V_{F,10}(\lambda)$ について、明所視における現行の分光視感効率 ($V(\lambda)$ および $V_{10}(\lambda)$) との比較を図 10 に示す。 $V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$ は約 500 nm 以下で顕

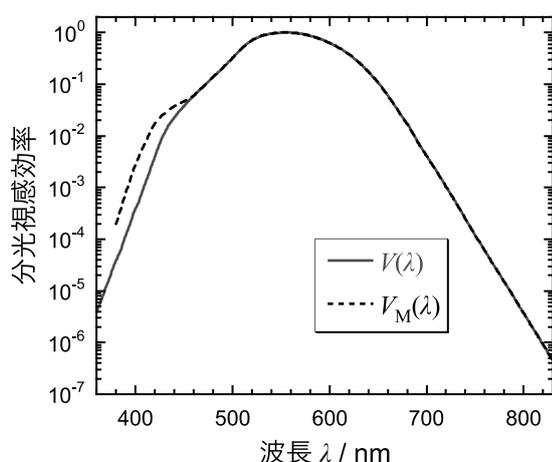


図 9 標準分光視感効率 $V(\lambda)$ とその短波長域 (459 nm 以下) の値のみが修正された分光視感効率 $V_M(\lambda)$ 。縦軸は対数目盛。 $V_M(\lambda)$ の数値は、文献⁴⁷⁾より引用

著な差異が見られる一方、10度視野の分光視感効率に関しては、 $V_{10}(\lambda)$ と $V_{F,10}(\lambda)$ の差は小さい。なお、 $V_F(\lambda)$ と $V_{F,10}(\lambda)$ は、現状では波長390 nmから830 nmまでの範囲にわたり、1 nmの間隔で数値が提供されている。可視域の下限と上限（それぞれ360 nmと830 nm）を考慮すると、短波長側（390 nm未満）の数値についてはさらなる検討が求められる。

ここで、測光の分野で広く用いられる明所視2度視野の分光視感効率に着目し、 $V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$ の差のプロットを図11に示す。ピーク波長から長波長側については概ね一致しているが、800 nm以上で2倍弱まで差が増大する。一方、ピーク波長から短波長側での差はより顕著

であり、400 nmにおいては約700%に達する。このように、波長域によって $V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$ との差は大きく異なるが、網膜上の錐体の分光データに基づいた $V_F(\lambda)$ （あるいは $V_{F,10}(\lambda)$ ）は、より科学的に厳密な測定を背景とした次世代の測光や測色に繋がるデータセットとして、注目を集めている。

CIEによる2つの技術レポートを受け、2022年5月に開催された測光放射測定諮問委員会（CCPR）総会においては、測光量の導出に用いられる $V(\lambda)$ を、 $V_F(\lambda)$ に置き換える可能性を検討すべき時期に来ているとの考えが示された⁵⁵⁾。測光量の導出において $V_F(\lambda)$ を用いることのメリットとして、

- より科学的信頼性の高い測光の実現
- 実際の視覚応答により忠実な明るさ・色の制御技術の発展
- より汎用性（年齢や性別などの考慮）の高い測光の実現

などが挙げられる。一方、デメリットや懸念事項としては、以下が考えられる。

- 現状の測光標準との不整合
- $V_F(\lambda)$ を用いることの定量的な影響評価が不十分
- 計測器の大規模な仕様変更の可能性（産業界への影響）

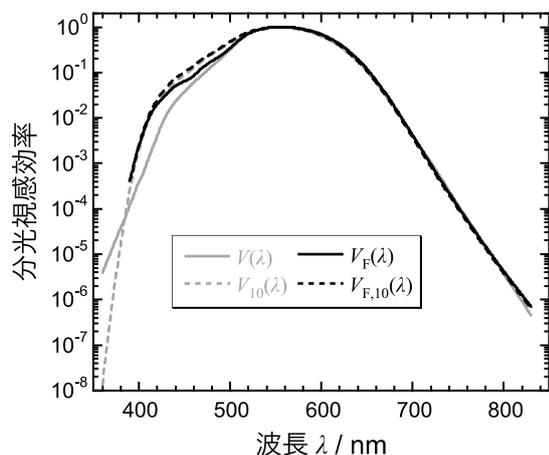


図10 従来の明所視分光視感効率と錐体分光感度に基づく新しい分光視感効率の比較。縦軸は対数目盛。 $V_F(\lambda)$ および $V_{F,10}(\lambda)$ の値は文献⁵³⁾より引用

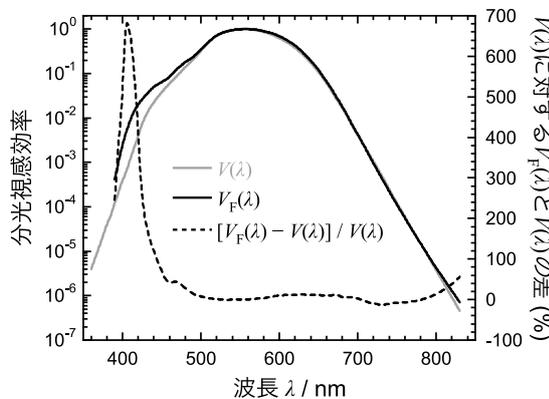


図11 明所視2度視野における分光視感効率($V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$)の比較とその差。第1縦軸のみ、対数目盛で表示している。

$V_F(\lambda)$ への置き換えを検討するにあたり、CCPRでは、“Cone Fundamental”と冠したタスクグループ（CCPR-WG-SP-TG16）が戦略企画ワーキンググループに設置された。本TGでは、CIE 170-2:2015⁵³⁾で定義された $V_F(\lambda)$ （および等色関数）をSI測光量に導入する必要性と利点を調査し、仮に導入が適切と判断されれば、 $V_F(\lambda)$ とそれに基づく測光量をSI単位に組み込むためのアプローチと戦略を提案することを目的としている。一方、CIEにおいては、“Implementation of CIE 2006 Cone Fundamentals in Photometric and Colorimetric Measurements”と冠した新しい研究フォーラム（RF-05）が2023年4月に設置されるなど、 $V_F(\lambda)$ の導入が与える影響を多角的見地から議論する場が提供されている。

$V_F(\lambda)$ に基づいて測光量を評価しようとするとき、例えば光度の場合、式(4)において $V(\lambda)$ が $V_F(\lambda)$ に置き換わることになる。したがって、 $V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$ のスペクトル形状の違いを反映して、導出される光度やその他の測光量に差が生じる。加えて、 K_m の値にも不整合

が生じることが予想される。カンデラの定義において、 540×10^{12} Hz の単色放射に対して定められている定数 K_{cd} ($= 683 \text{ lm W}^{-1}$) は、 K_m と以下の関係にある。

$$K_m = K_{cd} \cdot \frac{V(\lambda_m)}{V(\lambda_{cd})} \quad (9)$$

ここで、 $V(\lambda_m)$ は、 $V(\lambda)$ の最大値 ($= 1$) を意味しており、 $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ である。一方、 $V(\lambda_{cd})$ は、 $\lambda_{cd} (= 555.017 \text{ nm})$ における $V(\lambda)$ の値である。これらに基づき式 (9) を計算すると、 $K_m = 683.002 \text{ lm W}^{-1}$ となる。しかしながら、 λ_m と λ_{cd} のわずかなずれに起因する K_m と K_{cd} の差は、一般の測光における不確かさを考慮すると十分に無視できる程度であるため、 $K_m = K_{cd} = 683 \text{ lm W}^{-1}$ とすることができる。同様に $V_F(\lambda)$ についてこの影響を考慮すると、現状で CIE が提供している $V_F(\lambda)$ の数値は、波長 556.0 nm と 557.0 nm においてほぼ 1 であり、厳密に λ_m を定義することはできない。仮に、この間の数値である 556.5 nm を λ_m としても、現在の SI の定義の単色放射に対応する λ_{cd} ($= 555 \text{ nm}$) とのずれはやや大きくなる。これを加味して、仮に、現在の定義の K_{cd} を用いて $V_F(\lambda)$ に基づく最大視感効果度 ($K_{m,F}$ とする) を計算すると、

$$K_{m,F} = K_{cd} \cdot \frac{V_F(\lambda_m)}{V_F(\lambda_{cd})} = 683.7 \text{ lm W}^{-1} \quad (10)$$

であり、その差は約 0.1 % となり、測光量の評価に影響を及ぼすと考えられる。

数値計算での測光量の評価は式 (3) によって行うため、それぞれの分光視感効率 ($V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$) および最大視感効果度 (K_m と $K_{m,F}$) を用いれば、測光量に $V_F(\lambda)$ を導入することで相対的にどの程度の変化が生じるか、計算することができる。そこで、 $V(\lambda)$ に基づく従来の測光量 (Q_v) に対する、 $V_F(\lambda)$ 測光量 ($Q_{v,F}$) の差 ($\Delta Q_{v,F}$) を以下のように定義する。

$$\Delta Q_{v,F} = \frac{Q_{v,F} - Q_v}{Q_v} \quad (11)$$

ここで、 Q_v と $Q_{v,F}$ は、評価対象となる光源の相対分光分布 $\Phi_{rel,\lambda}(\lambda)$ を用いて、以下の式で計算する。

$$Q_v = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (12)$$

$$Q_{v,F} = K_{m,F} \int_{390 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot V_F(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13)$$

表 4 は、いくつかの白色光源の典型的な相対分光分布 (図

12 参照) を用いて、 $\Delta Q_{v,F}$ を計算した結果である。

以上のように、 $V_F(\lambda)$ に基づいて測光量を数値計算で評価すると、今回対象とした光源では +5 % 強の差が生じる。測光量における数パーセント以上のずれは、実測定の不確かさ (1 % 弱) を考慮すると無視できない差になると考えられるため、 $V_F(\lambda)$ に対応した測光技術の開発が必要である。また、図 11 に示したように、 $V(\lambda)$ と $V_F(\lambda)$ の差は約 400 nm 付近で特に大きいため、この波長域に大きな相対分光分布をもつ光源 (青色 LED など) の場合、 $\Delta Q_{v,F}$ は著しく増大すると考えられる。実際に、ガウス関数で記述した仮想の単色光源スペクトル (半値全幅 10 nm, 中心波長 400 nm) に対して計算を行うと、 $\Delta Q_{v,F}$ は約 570 % に達する。したがって、多様化している種々の光源に対し実計測で $V_F(\lambda)$ に基づく測光量を評

表 4 $V_F(\lambda)$ に基づいて各種光源の測光量を評価した場合における、従来の $V(\lambda)$ 測光量との差 ($\Delta Q_{v,F}$)。計算には、式 (11) を用いた。

光源	$\Delta Q_{v,F}/\%$
白熱光源	5.41
白色 LED	5.13
白色蛍光灯	5.08
高圧ナトリウムランプ	6.33

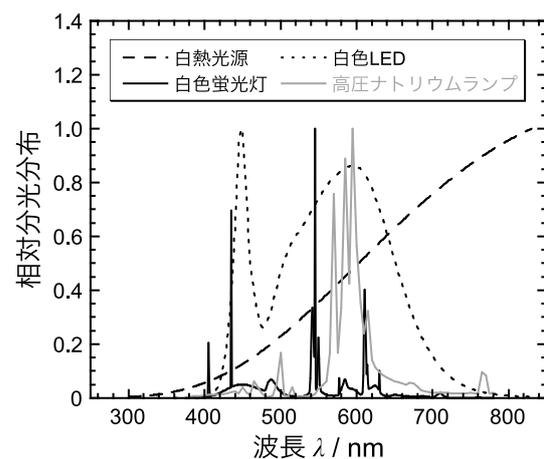


図 12 表 4 における計算に用いた白色光源の相対分光分布 $\Phi_{rel,\lambda}(\lambda)$ 。白熱光源は CIE 標準イルミネント A⁵⁶⁾、白色 LED は CIE 参照スペクトル L41⁵⁷⁾ の分光分布であり、白色蛍光灯および高圧ナトリウムランプについては文献⁵⁶⁾ より引用。

価することで、現状の測光量との間に生じる不整合を分析することは、 $V_F(\lambda)$ への置き換えを議論するための重要な技術課題と考えられる。

3.2.3 $V_F(\lambda)$ に基づく測光手法の最適化の試み

$V_F(\lambda)$ に基づいた測光 ($V_F(\lambda)$ 測光) が、明るさや色の評価に与える影響を理論的に評価した研究は報告されており、色度における視覚的なミスマッチを低減させる効果⁵⁸⁾や、照明用光源の性能評価に影響を与える可能性が指摘されている⁵⁹⁾。一方、 $V_F(\lambda)$ 測光の実験的検証は、筆者の知る限りほとんど報告がない。そこで、新しい分光視感効率の提起に対する今後の研究課題として、 $V_F(\lambda)$ 測光手法の最適化と実測による検証を設定する。

実計測検証が進んでいない要因として、 $V_F(\lambda)$ が数値データとして与えられれば、対象となる光源の分光分布を用いて数値計算による評価が可能になる点が挙げられる。しかし、精密な絶対分光分布測定は一般に容易でなく、その不確かさは比較的大きい(相対標準不確かさで数パーセント)のが現状である。実際に、光度・照度単位の具現においても、分光測定を用いずに、2.2.1節で示した方法が広く用いられている。また、CIE 170-2:2015⁵³⁾においては、390 nm以上での分光視感効率データしか提供されておらず、最大波長 λ_m が定義できないなど、データの内外挿や平滑化が十分でない。そこで、下記の3つの測定方法を総合的に検証することで、 $V_F(\lambda)$ 測光手法の最適化を試みる。

第一に、光度・照度測定の不確かさが最も小さいと考えられ、かつ、現状の単位具現方法に則した手法として、 $V_F(\lambda)$ に分光応答度が近似した受光器 ($V_F(\lambda)$ 受光器)の作製と評価を行う。測定の概要としては、図3に示したセットアップが考えられる。複数の光学フィルタとSi PDを組み合わせた系を第一候補として、分光応答度が $V_F(\lambda)$ との高い一致度の実現する系を見出す。産総研では、過去に5枚の色ガラスフィルタとSi PDを組み合わせることで $V(\lambda)$ 受光器を実現しており、この知見をベースに $V_F(\lambda)$ 受光器の光学設計手法の最適化を図る。得られた $V_F(\lambda)$ 受光器の分光特性を評価し、代表的な光源に対する測光データを取得する。また、従来の $V(\lambda)$ に基づく測光体系での測定結果との対比を含め、測定の信頼性の程度を評価し、 $V_F(\lambda)$ 測光の計測上の課題を明らかにする。

第二の手法として、従来型の $V(\lambda)$ 受光器(照度計など)による測定結果に補正を加える方法を検討する。市販の照度計は、図3に示した $V(\lambda)$ 受光器に類似した構成となっており、容易に測光量の計測が可能である。照度計

での測定値に、分光応答特性の $V_F(\lambda)$ との外れに基づく補正(スペクトルミスマッチ補正)を加えることで、 $V_F(\lambda)$ 測光量への変換が可能である。ただしこの補正には、受光器の分光応答度と光源の分光分布の情報が必要であるため、全ての測定場面で必要情報を与えることは難しい。受光器や光源の種類をグループ化し代表値を与えた場合を検証し、本手法の適用可能範囲を明らかにする。

第三に、汎用型の分光測定器で取得した分光放射照度からの数値演算による手法を検証する。対象とする光源を分光器で測定し、分光放射照度として光源のスペクトル情報を得る。ここから得られた分光放射量を用いて、式(3)に $V_F(\lambda)$ を適用し、計算により $V_F(\lambda)$ 測光量を求める。計算に用いる K_m の値については、 K_{cd} を採用する場合や、3.2.2節で述べた $V_F(\lambda)$ を考慮して計算した値を採用する場合を検証し、その違いが測光量の評価結果に与える影響を評価する。

以上のように、 $V_F(\lambda)$ 測光に対して複数のアプローチを検証し、計測上の課題を明確にすることで、 $V_F(\lambda)$ への置き換えの是非の判断に資する定量的なデータを提供することが可能となる。さらに、スペクトルミスマッチ補正や数値計算を用いる方法では、 $V_{F,10}(\lambda)$ に基づく測光量の導出も原理的に可能であり、より広い視点で導入のメリット・デメリットを議論することが今後重要と考えられる。

4. まとめ

本研究では、光度や照度などの測光量を対象に、標準の維持・供給における現状と問題を調査した。これらの調査内容を踏まえ、光度・照度標準の将来展望について考察し、今後の研究課題の設定を行った。

放射量から測光量を導くためには、人間の視覚特性を代表する関数として、分光視感効率を用いた波長による重み付けが必要である。これに対応して、光度単位は、分光視感効率に応答度が近似した受光器を用いて実現されている。一方で、測光量は白熱型標準電球への値付けを介して産業界へ供給されているにも関わらず、測光量を含めた白熱型電球は世界的に製造や販売が中止される方向に進んでいる。そこで、白熱型標準電球への依存度低減のため、受光器の応答度に基づく測光標準体系が整備されているが、長期安定な標準供給には受光器のさらなる高性能化(長期安定化)が必要であることが分かった。一方、より視覚応答に忠実な測光の実現に向けて、人間の視細胞の錐体分光感度評価に基づく新しい分光視感効率関数 $V_F(\lambda)$ がCIEにより提唱された。実際に、測

光標準の運用において従来の標準分光視感効率 $V(\lambda)$ を $V_F(\lambda)$ へ置き換えることの是非を検討するため、CCPR や CIE を中心にして国際的な議論がスタートしている。しかし、 $V(\lambda)$ から $V_F(\lambda)$ への置き換えによる影響を多角かつ定量的に分析するには、実計測に基づく検証が不可欠である。これらの課題解決に寄与するため、受光器の高度作製・評価技術を軸として、測光受光器の経年変化要因の特定や、新しい分光視感効率関数に基づく受光器の開発を進める。

謝辞

本調査研究の遂行および報告書の作成にあたり、木下健一 主任研究員、萩洋司 前研究グループ長（現研究戦略企画部 連携主幹）、市野善朗 研究グループ長をはじめとする光放射標準研究グループ諸氏より懇切丁寧なご指導を賜りました。また、神門賢二 主任研究員（物理計測標準研究部門 応用光計測研究グループ）には照度応答度標準や標準 LED 光源に関する資料や文献をご提供いただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) BIPM.org. SI Brochure: The International System of Units (SI) 9th edition (2019).
- 2) 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 (2022). 525p.
- 3) 萩洋司. 国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準, 67 (2019).
- 4) P. E. Ciddor. *Appl. Opt.*, 35, 1566 (1996).
- 5) CIE 018:2019, The Basis of Physical Photometry, 3rd Edition (2019).
- 6) CIE 165:2005, CIE 10 Degree Photopic Photometric Observer (2005).
- 7) CIE 191:2010, Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance (2010).
- 8) ISO/CIE 23539:2023, Photometry - The CIE system of physical photometry (2023).
- 9) 齊藤一朗. 光学, 32, 181 (2003).
- 10) J. E. Martin, N. P. Fox, and P. J. Key. *Metrologia*, 21, 147 (1985).
- 11) Y. Zong, M. E. Nadal, B. K. Tsai, and C. C. Miller. NIST Special Publication 250-95 (2018).
- 12) A. A. Gaertner, Éric Côté, J. Campos, G. Obein, P. Blattner, R. Schafer, L. Hui, J. Xiaomei, C. Miller, Y. Zong, E. Atkinson, E. Thorvaldson, K. Kinoshita, R. Sieberhagen, I. Rabe, T. Goodman, B. Scott, A. Sperling, D. Lindner, B. Khlevnoy, and E. Ivashin. *Metrologia*, 59, 02002 (2022).
- 13) BIPM.org. The KCDB - the BIPM key comparison database. <https://www.bipm.org/kcdb/>. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 14) C. L. Cromer, G. Eppeldauer, J. E. Hardis, T. C. Larason, and A. C. Parr. *Appl. Opt.*, 32, 2936 (1993).
- 15) W. Erb and G. Sauter. *Metrologia*, 34, 115 (1997).
- 16) P. Toivanen, P. Kärhä, F. Manoochehri, and E. Ikonen. *Metrologia*, 37, 131 (2000).
- 17) F. Samedov, M. Durak, and Özcan Bazkir. *Opt. Lasers in Eng.*, 43, 1252 (2005).
- 18) Y. Zong. NEW GENERATION OF REFERENCE PHOTOMETERS FOR REDUCED UNCERTAINTY (2023). CIE 2023, Poster Session 1, PO45.
- 19) P. Schneider, K. Salfner, A. Sperling, S. Nevas, I. Kröger, and T. Reiners. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 972, 012016 (2018).
- 20) M. Schuster, S. Nevas, and A. Sperling. *Appl. Opt.*, 53, 2815 (2014).
- 21) P. Schneider, S. Nevas, D. Lindner, L. Werner, U. Linke, and A. Sperling. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2149, 012008 (2022).
- 22) Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, and T. Mukai. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43, 354002 (2010).
- 23) M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, L. Zhou, G. Harbers, and M. G. Craford. *J. Disp. Technol.*, 3, 160 (2007).
- 24) K. T. Kamtekar, A. P. Monkman, and M. R. Bryce. *Adv. Mater.*, 22, 572 (2010).
- 25) The European Union. Commission Regulation (EC) No 244/2009. <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/244/oj>. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 26) The European Union. Commission Regulation (EU) 2019/2020. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2020/oj>. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 27) U.S. Department of Energy (DOE). Energy Conservation Program: Definitions for General Service Lamps; Final rule. <https://www.regulations.gov/document/EERE-2021-BT-STD-0012-0022>. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 28) Reuters. China to phase out incandescent light bulbs in 5 years: report. <https://jp.reuters.com/>

- article/idUSTRE7A40MU/. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 29) 資源エネルギー庁. エネルギー消費機器製造事業者等の省エネ法規制. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/equipment/. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 30) Minamata Convention on Mercury. Fifth meeting of the Conference of the Parties to the Minamata Convention on Mercury (COP-5). <https://minamataconvention.org/en/meetings/cop5>. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 31) 経済産業省. 「水銀に関する水俣条約第5回締約国会議」の結果について. <https://www.meti.go.jp/press/2023/11/20231109001/20231109001.html>. Online; accessed 18 Jan 2024.
- 32) 大場信英. 電気試験所彙報, 23, 40 (1959).
- 33) 独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE). 計量法校正事業者登録制度 (JCSS). <https://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/index.html>. Online; accessed 19 Jan 2024.
- 34) BIPM.org. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes (1999).
- 35) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). NEWSTAND. <https://www.ptb.de/epm2022/newstand/home>. Online; accessed 19 Jan 2024.
- 36) K. Godo, T. Zama, S. Matsuoka, K. Ishida, and Y. Yamaji. *Proc. NEWRAD 2008*, 217 (2008).
- 37) E. Ivashin, S. Ogarev, B. Khlevnoy, S. Shirokov, D. Dobroserdov, and V. Sapritsky. *J.Phys.: Conf. Ser.*, 972, 012009 (2018).
- 38) J. Y. Yan, H. Liu, W. Q. Zhao, Y. Su, and L. Jiang. *Proc. 29th CIE Session*, 1274 (2019).
- 39) Y. Nakazawa, K. Godo, K. Niwa, T. Zama, Y. Yamaji, and S. Matsuoka. *Lighting Res. Technol.*, 51, 870 (2019).
- 40) T. Gerloff, L. Kallenbach, J. Ledig, C. Schrader, A. Sperling, T. Pulli, J. Askola, M. Šmid, P. Kliment, A. P. Aglio, A. Ferrero, P. Gál, G. Brida, P. Blattner, F. Stuker, M. Schneider, T. Dönsberg, and T. Poikonen. *Proc. 29th CIE Session*, 1274 (2019).
- 41) 藤洋司. 光学, 42, 114 (2013).
- 42) 木下健一. 産総研計量標準報告, 41, 7 (2008).
- 43) H. Shitomi, Y. Iwasa, and K. Kinoshita. Potential of tungsten filament-based lamps in the market as an alternative transfer standard (2023). NEWRAD 2023, Poster Session.
- 44) C. L. Cromer, G. Eppeldauer, J. E. Hardis, T. C. Larason, Y. Ohno, and A. C. Parr. *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.*, 101, 109(1996).
- 45) G. P. Eppeldauer and M. Rácz. *Appl. Opt.*, 43, 2621 (2004).
- 46) 作花済夫. ガラス科学の基礎と応用. 株式会社内田老鶴圃 (2010). 361p.
- 47) CIE 086:1990, CIE 1988 2° spectral luminous efficiency functions for photopic vision (1990).
- 48) J. Vos and P. Walraven. *Vision Res.*, 11, 799(1971).
- 49) V. C. Smith and J. Pokorny. *Vision Res.*, 15, 161 (1975).
- 50) A. Stockman, L. T. Sharpe, and C. Fach. *Vision Res.*, 39, 2901 (1999).
- 51) A. Stockman and L. T. Sharpe. *Vision Res.*, 40, 1711 (2000).
- 52) CIE 170-1:2006 Fundamental chromaticity diagram with physiological axes - Part 1 (2006).
- 53) CIE 170-2:2015 Fundamental chromaticity diagram with physiological axes - Part 2: Spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams (2015).
- 54) L. T. Sharpe, A. Stockman, W. Jagla, and H. Jägle. *Color Res. Appl.*, 36, 42 (2011).
- 55) BIPM.org. Report of the 25th meeting (10-11 May 2022) to the International Committee for Weights and Measures (2022).
- 56) CIE 015:2018, Colorimetry, 4th Edition (2018).
- 57) CIE 251:2023, LED Reference Spectrum for Photometer Calibration (2023).
- 58) M. Royer, M. J. Murdoch, K. Smet, L. Whitehead, A. David, K. Houser, T. Esposito, J. Livingston, and Y. Ohno. *LEUKOS*, 19, 35 (2023).
- 59) W. Song and D. Durmus. *Buildings*, 12, 2220 (2022).

