

光度の単位「カンデラ」および測光・放射標準

蔀 洋司

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 光放射標準研究グループ長

1 はじめに

カンデラ (cd) は光度の単位であり、国際単位系 (SI) の基本単位の一つである。光度は、人間の視覚を加味した光の強さを表す量で、明るさの知覚を定量化する際の指標となる。人間の持つ五感（視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚）の中で、一般的に最も多くの情報を与えるのが視覚であると言われている。視覚は、眼の網膜上での光子と分子の相互作用に基づく光生物学的効果の一つであり、我々人類は、明るさや色に代表される視覚情報を、昼夜を問わず得るための手段として、最初は炎を、後にランプなどの人工光源を照明として利用してきた。そうした中で、光による視覚刺激を定量的に測定・評価する手段が必要となり、様々な照明環境を再現性よく正確に評価する目的から、測定の基準となる測光標準の整備や国際協調が進められ、高度な計量標準の体系が運用されてきた。

光度およびその関連量は、対象となる光に対して、人間の視覚情報に基づく重み付けを伴う測定量であることから、純粋な物理量ではなく心理物理量に区分される。このためカンデラは、SI の中ではやや特殊な単位であるが、視覚情報を加味した光の定量化は我々の日常生活に密接に関連したものである。そうした重要性が、カンデラを SI 基本単位の一つとして位置付ける根拠を与えている。

長年に渡る世界的な研究の集大成として、2018 年 11 月の第 26 回国際度量衡総会 (CGPM) の決議に基づき、質量、電流、温度、物質量の各基本単位の定義が大幅に改定された。この定義改定は、人工的な器物に依存しない単位系の実現をはじめ、多くの科学的な価値を持っているが、もう一つ大きな変革があった。今回の改定に伴い、国際単位系 (SI) における 7 つの基本単位は全て、基礎物理定数（または常用定数）に基づく定義へと表現が改められた。カンデラについても今回、視感効果度 K_{cd} (単位 lm W^{-1}) に基づいて定義する表現へと修正する改定が決議された。

本稿では、カンデラの定義および実現方法について紹介すること主眼としつつ、他の SI 基本単位と比べると“一見”風変わりな印象を受けるカンデラについて正しく理解するために必要となる、測光量の

基本的な考え方について解説すると共に、測光・放射測定に係る単位を考える上で不可欠となる、主要な測光量および放射量の標準（本稿では測光・放射標準と総称）とそれらの相互関係について解説することを目的とする。加えて、関連する最近の研究成果についても紹介する。

2 測光量および放射量

2.1 測光量、放射量とは

X 線への移行領域の波長（約 1 nm）から、電波への移行領域の波長（約 1 mm）までの波長範囲の電磁放射を光放射 (Optical Radiation) と称する。これに対して、光 (Light) には、視覚系に生じる明るさ及び色の知覚・感覚を意味すると共に、人の目に入って直接に視覚を起すことができる放射、即ち可視放射という狭義の定義がある¹⁾³⁾。一般的な光のイメージとしては可視放射以外の波長域の放射、例えば紫外放射 (UV) や赤外放射 (IR) も含まれると広義に考えられることもあり、慣用的な使われ方や技術分野による解釈の幅があるが、例えば照明工学の分野では、国際的には狭義の定義が採用されている。本稿で測定対象として取り扱っている光放射は、主として紫外域、可視域、近赤外域（概ね 200 nm から 2500 nm の波長域）についてである。また本稿では、光放射と光を努めて使い分けて記載している一方で、例えば「光源」、「分光」、「発光」などの一般に確立した用語もあり、それらはそのまま使用している点にご留意頂きたい。

光放射は電磁放射であり、自由空間を伝搬する。この伝搬されるエネルギーを基準に光放射を定量化したものが放射量であり、放射量に対する測定を放射測定 (Radiometry) と呼ぶ。放射量において最も基本的な量は放射束である。放射束は、放射によって単位時間当たり伝搬するエネルギー、言い換えると放射パワーを表す量であり、 W ($= \text{J s}^{-1}$) の単位で表される。

自由空間を伝搬する光放射の計測は、空間、時間、波長の 3 つの要素を同時に加味する必要がある。レーザなどの単色性の極めて高い光放射を対象とする場合を除き、光放射の多くは、単色性に乏しく輝線ではない連続スペクトルを持っているため、波長の関数として捉える必要がある。つまり、単位波長あた

りの放射量を加味することが必要であり、これを分光放射量と言う。単位は波長 λ を nm 単位で表し $W\text{ nm}^{-1}$ とすることが多い。分光放射量を波長積分した結果が放射量を与える。放射束 Φ_e に対応する分光放射量は分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ であり、両者は、以下で示される微分・積分の関係で表される。

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi_e}{d\lambda} = \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \quad (2)$$

その他の放射量は、放射束と幾何学的な量（面積、立体角など）および時間の組合せで定義される（2.2 参照）。

一方で、人間の視覚に対して光放射が与える影響に基づき光放射を定量化したものが測光量であり、測光量に対する測定を測光（Photometry）と言う。明るさなど、光が人間の視覚に与える影響の定量化は古くから人類にとって重要であり、度量衡の観点では、放射測定よりも測光の方が歴史は古い。初期の測光は、肉眼での直接的な比較測定（視感測光）に基づき行われていた。現代の測光は、光検出器に基づく物理測定により行われているが、視覚応答（感度）は人それぞれに異なることから、正確な測光を実現するために、光が人間に与える知覚を定式化する関数を内在させた体系が必要となる。このため測光においては、人間の目の感度を代表する特性を有する測光標準観測者を定義し、測光標準観測者の目の感度を、波長に対する2つの代表的な関数（分光視感効率関数）として定めている。

一つは明所視の標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ であり、これは、主に 5 cd m^{-2} 以上の輝度レベルの明所視（いわゆる明るい条件下）での測光に用いられる。厳密には、 $V(\lambda)$ は、錐体細胞が密である網膜の中心部分（中心窩）に光が結像した観察状態（中心視）に対応した分光視感効率関数であり、その時の視野範囲に由来して2度視野における標準分光視感効率関数とも称される。もう一つは暗所視の標準分光視感効率関数 $V'(\lambda)$ であり、 0.005 cd m^{-2} 以下の輝度レベルの暗所視（いわゆる暗い条件下）での測光に用いられる。暗所視条件は、網膜の桿体細胞に由来した分光視感効率関数であり、中心窩には殆ど分布していないため、暗所視条件は網膜の中心から外れた領域を使った観察状態に対応したものであり、これを周辺視と呼ぶ。

図1に、明所視および暗所視の標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ を示す。人間の眼が感度を持つ波長は 360 nm から 830 nm の可視域であり、これが

可視放射の定義波長範囲になっている。 $V(\lambda)$ の値は可視域において ($V'(\lambda)$ は 380 nm から 780 nm の範囲で) 1 nm 刻みの数表として定義されている。その間の波長での値が必要な場合は、線形補間によって求める。 $V(\lambda)$ は、明るさの知覚を与える網膜内の視細胞のうち錐体細胞の応答に起因するものであり、波長 555 nm で最大値となる。それ以外の波長では、 555 nm から離れるにつれて値が0に近づく釣りの関数形状である。波長 555 nm の光は緑色の知覚を与えるため、人の眼は緑色の光に対する感度が最も高く、青色や赤色に対する感度が低いことになる。一方で、 $V'(\lambda)$ は視細胞の中の桿体細胞の寄与に基づくものであり、ピーク波長が短波長側にシフトし、 507 nm でピークを与える。

$V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ に基づき、放射量と測光量の間に関係を確立する方法は、国際照明委員会 (CIE) において長年検討されてきたものであり、現在、CIE 物理測光システムとして標準化されている⁴⁾。CIE は当時の研究成果の集大成として、1924年に明所視の分光視感効率 $V(\lambda)$ の値を初めて定めた⁵⁾。その後、内外挿や平滑化などの諸検討を経て、1972年に国際度量衡委員会 (CIPM) で採択された⁶⁾。同様に、暗所視の分光視感効率 $V'(\lambda)$ は1951年にCIEで勧告され⁷⁾、1976年にCIPMで採択された⁸⁾。このようにして確立した $V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$ が、現在の測光体系の根幹を支えており、1979年以降、カンデラの定義に基づく各種測光量および放射量の体系の根幹となっている。

明所視条件において、前述の放射束 Φ_e に対応する測光量は光束 Φ_v (単位:ルーメン lm) であり、CIE 物理測光システムでは分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ と $V(\lambda)$ を用いて、

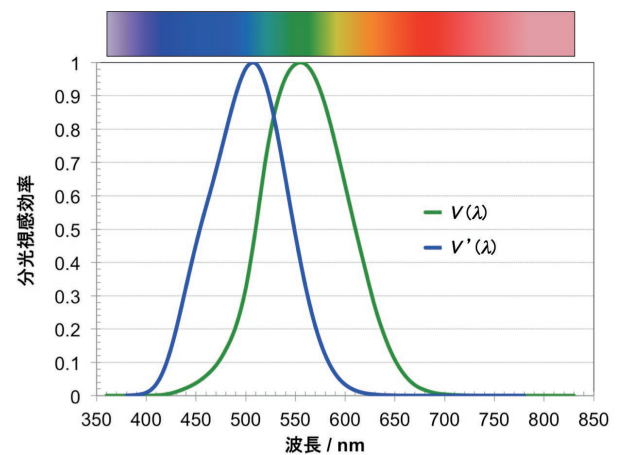


図1 標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

で与えられる。ここで K_m は最大視感効果度である。 K_m の値はカンデラの定義から、 $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ となるが、これについては3.1で述べる。同様に、暗所視条件について

$$\Phi'_v = K'_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

という関係が成立する。ここで Φ'_v の単位は同じくルーメン (lm) であり、(3)式で示した光束と等価な関係にあるが、導出に用いた分光視感効率関数の違いを明示するため暗所視光束と称する。また $K'_m = 1700 \text{ lm W}^{-1}$ と与えられる。(3)式で導かれた Φ_v についても、必要に応じて明所視光束と称する場合もある。また、(3)式および(4)式から分かるように、測光量では加法性が成立する。

2.2 測光量および放射量の代表的な量および単位

2.1では、単位上もっとも単純な放射束 Φ_e を出発点に、類似次元の単位を持つ分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ と光束 Φ_v の関係を取り上げたが、光放射の空間伝搬特性は多様であるため、上記の量を面積や立体角で規格化した量が、光放射の定量化において必要不可欠である。表1に主要な放射量および対応する分光放射量、測光量ならびにそれらの単位を示す。以下、放射量を例として、放射束から各量がどのように定義上、組み立てられるかについて示す。分光放射量、測光量についても同様の考え方で各量が定義されている。

放射照度 E_e は、ある面要素 dA に入射する放射束の面積密度であり、次式で表される。

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (5)$$

放射強度 I_e は、点光源（照射を受ける面までの距

離に比べて大きさが無視できる程度に小さい光源）への近似ができる場合のみ定義可能な量で、光源から張られる円錐の立体角要素 $d\Omega$ 内を伝播する放射束の密度として、次式で表される。なお、本稿の主題であるカンデラ (cd) は、放射強度に対応する測光量である光度の単位である。

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (6)$$

放射発散度 M_e は、表面のある点を含む面積要素 dA から放射される放射束の面積密度であり、次式で表される。(5)式と同じ表式となるが、対象としている場所が異なっている点に注意が必要である。

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (7)$$

放射輝度 L_e はやや特異な量であり、光源の中心から張られる円錐の立体角要素内を伝搬する放射束について、光源の面積要素 dA に対する密度として定義される量である。実際の定義としては、光源を点と見なせず、その広がり方を考慮する必要がある場合の取り扱いとして、光源の面要素 dA から観測方向への放射強度 dI_e を考えた時の面積密度として、次式で表される。

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cdot \cos\theta} \quad (8)$$

ここで、 θ は光源の面上の法線と観測方向との角度である。

放射発散度および放射輝度については、自発光の場合に加えて、反射体や透過体上の面要素および放射束が通過する仮想的な面（空間上の像面）にも適用可能であり、反射面、透過面、仮想面を二次光源と考える。また、光源から発せられる放射束を全空間について積分した量を全放射束と呼び、対応する分光放射量は分光全放射束、測光量は全光束である。さらに、表1で示した量に加えて、時間積分した量や、光子数で表現する量も定義されている⁹⁾。

光放射は、分光分布や空間伝搬特性が多様で、こ

表1 代表的な測光量および放射量とその単位、量記号

放射量			単位波長で規格化した放射量			対応する測光量		
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
放射照度	E_e	W m^{-2}	分光放射照度	$E_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	照度	E_v	lx (= lm m^{-2})
放射強度	I_e	W sr^{-1}	分光放射強度	$I_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$	光度	I_v	cd (= lm sr^{-1})
放射発散度	M_e	W m^{-2}	分光放射発散度	$M_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	光束発散度	M_v	lm m^{-2}
放射輝度	L_e	$\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$	分光放射輝度	$L_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	輝度	L_v	cd m^{-2} (= $\text{lm sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

れらが均一とみなせる場合は極めて少ない。そのため、最もシンプルな単位を持つ放射束のみで放射特性を評価することは現実的ではなく、表1に示した、放射束の波長微分や空間微分の単位次元を持つ量が必要となる。また、光源や検出器の受光面の応答が均一とみなせる場合も同様に少なく、光源と受光面に対して定義される量が必要になる。さらに、前述のとおり物理量としての放射量と、心理物理量としての測光量の双方が必要となる。これらが、測光・放射測定には非常に多くの測定量が存在し、各々の量が相互に組み合わせられる複雑な体系となっている所以である¹⁰⁾。図2に、測光・放射測定における主要な測定量について、点光源から放射される放射束を起点に、面積や立体角を介して関連付けられる測定量の相互関係を模式的に示す。

3 光度の単位「カンデラ (cd)」

3.1 定数 (K_{cd}) に基づく新しい定義の表現

2018年11月の第26回国際度量衡総会 (CGPM) の決議に基づき、7つのSI基本単位の一つである光度の単位「カンデラ (cd)」は、2019年5月20日以降、以下の定義で与えられることとなった。

「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 $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ 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。さらに、上記の定義には以下の補足が付記されている。

「この定義は、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に

ついて $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ という正確な関係を示唆している。この関係式を反転させると定義値 K_{cd} 、 h 、 $\Delta\nu_{Cs}$ と関連付けられたカンデラに関する正確な式が得られる。

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} \quad (9)$$

これは次と等しい。

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{1}{(6.62607015 \times 10^{-34}) \times (9192631770)^2 \times 683} \right) (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \approx 2.614830 \cdots \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \quad (10)$$

この定義は、1カンデラは、所定の方向における、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射を放つ光源の光度であり、その方向における放射強度が $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ であることを意味している。」

これにより、1979年の第16回CGPMでの決議以降有効であったカンデラの定義が廃止されたが、上記の補足説明の最終段落は、1979年のカンデラの定義そのものであり、今回のカンデラの定義改定は、視感効果度を定数とする表現への修正であり、技術的な内容を何一つ変えていない。

カンデラの定義は一見すると分かりにくい内容と映るが、これは、ある特定の周波数の光放射における放射量と測光量の関係を厳密に結びつけるものである。単色放射の波長ではなく周波数で表現しているのは、伝搬媒質の屈折率による影響を排除するためである。周波数 540×10^{12} Hz の単色放射は、標準大気¹¹⁾ (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) 中での波長が $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ となる。従って、カンデラの定義は、標準大気中において波長 555.017 nm で 1 W の放射束を持つ単色放射の光束が 683 lm であることと同義である。つまり、波長 555.017 nm で $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ の放射強度を持つ単色放射の光度は 1 cd となり、これは従前のカンデラの定義で用いられた表現である。

次に、カンデラの定義を周波数 540×10^{12} Hz の単色放射以外に拡張する考え方について述べる。測光量の導出には標準分光視感効率関数が必要であることは2章で述べたとおりであるが、 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ はそれぞれ $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ 、 $\lambda'_m = 507 \text{ nm}$ でピーク (つまり値が1) となる。ここで、ある光放射について光束 Φ_v (暗所視では Φ'_v) を放射束 Φ_e で除した値 K (暗所視では K') を考えると、これらは $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ の各ピーク波長で最大値を与え、これを最大視感効果度 K_m (暗所視では K'_m) と呼ぶ。また、カンデラの定義で用いられている、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に対する視感効果度 (定数) を特に K_{cd} と称する。 K_{cd} と最大視感効果度 K_m および K'_m との関係は下記の式で表される。

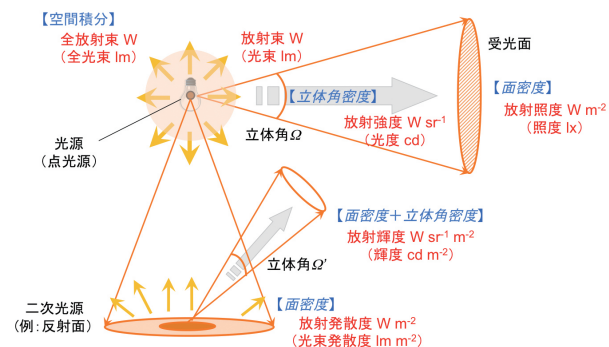


図2 点光源から放射される光放射とその主要な測定量との関係図 (括弧内は対応する測光量)

$$\begin{aligned}
 K_m &= K_{cd} \cdot \frac{V(\lambda_m)}{V(\lambda_{cd})} \\
 &= \frac{683 \text{ lm W}^{-1}}{V(555.017 \text{ nm})} \\
 &= 683.002 \text{ lm W}^{-1} \approx 683 \text{ lm W}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 K'_m &= K_{cd} \cdot \frac{V'(\lambda'_m)}{V'(\lambda'_{cd})} \\
 &= \frac{683 \text{ lm W}^{-1}}{V'(555.017 \text{ nm})} \\
 &= 1700.13 \text{ lm W}^{-1} \approx 1700 \text{ lm W}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

2.1 で示した、測光量と放射量の関係を表す (3) 式および (4) 式を用いて、ここに (11) 式および (12) 式で与えられる K_m および K'_m を適用することで、カンデラの定義に沿って、周波数 540×10^{12} Hz 以外の単色放射や、例えば白色光のような複数の波長成分を有する光源の光度を求めることができる。カンデラの定義で用いられている波長は、厳密には $V(\lambda)$ のピーク波長と一致しないため、 K_{cd} の値と K_m の値には僅かな差があるが、その差は一般的な測光標準の不確かさを考慮すると十分に無視し得る程度であり、実際の測光において、 $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ 、 $K'_m = 1700 \text{ lm W}^{-1}$ として差し支えない。

ここで、カンデラの定義において、2つの異なる分光視感効率関数を適用しているのに、なぜ一つの単位で運用できるのか、という点について補足したい。図3は、 $K(\lambda) = K_m \times V(\lambda)$ 、 $K'(\lambda) = K'_m \times V'(\lambda)$ で与えられる分光視感効果度 (lm W^{-1}) であり、これは各波長の単色放射 1 W あたりの光束の値に相当する。図3から分かるように、 $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ の波長で両者が 683 lm W^{-1} となるように規格化されており、これによって、測光量と放射量の関係は保持され、使用した分光視感効率関数を明示することで、基準となる明所視の標準分光視感効率関数および最大視感効

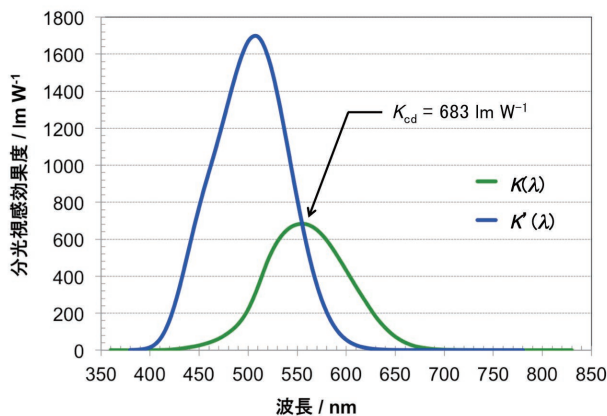


図3 カンデラの定義に基づく分光視感効果度 $K(\lambda)$ および $K'(\lambda)$

果度から導出される測光量と等価な測光量を与える。これは、(11) 式および (12) 式の最大視感効果度の導出原理そのものである。

3.2 カンデラの歴史

度量衡としての測光・放射測定は、1729年の光度計の開発に遡ることができる¹²⁾。この光度計は、2つの光源でそれぞれ照射された半透明のスクリーン上の輝度を肉眼で観測し、輝度が等しくなるように光源の距離を変えるものであり、逆二乗則の概念に基づく光度の比較測定の原型となるものである。その後、ランバートの余弦則¹³⁾などの測光の基本理論や、より精緻な視感測光器の開発が進められた。

測光単位は、原料、質量、消費速度が厳密に定められた標準蠟燭の仕様書が1860年に英国で設定され¹⁴⁾、その蠟燭1本あたりの水平光度を、光の強さの単位としたのが起源と言われている。この時に用いられた単位はCandle (燭) であった。その後、より安定な燃焼炎としてガス灯 (ペンタン灯など) が用いられるようになり、英米仏の3カ国により1909年、当時国ごとに独自運用されていた光度の単位統一が合意され、International Candle (国際燭) が設定された。日本で光度単位が定められたのは1911年であり、電気試験所がペンタン灯の標準状態における水平光度の1/10を1電試燭と規定したのが始まりである¹⁵⁾。しかし、燃焼炎に基づく標準は、国際的に合意された光度の単位を運用する上では、安定性や再現性に依然として多くの課題があった。

19世紀の中頃から既に、金属への通電に伴う発光を光度の基準とする研究が行われており、後に白金の凝固点における単位面積あたりの発光量に基づいて、光度の単位を定義する方法が提案された。この原理をもとに、1930年に米国国立標準局 (NBS) において、中心に細管構造を持つ酸化トリウムのルツボに白金を充填した構造を有する黒体放射炉が開発された¹⁶⁾。日本でも電気試験所が、同様の原理による白金点黒体標準器の開発に成功した¹⁷⁾。当時、黒体標準器を用いて一次標準を実現できた研究機関は日本を含む数カ国のみであり、そこで得られた測定データが、光度の一次標準として、白金の凝固温度における黒体の輝度を国際的に採用する根拠となった。

白金点黒体標準器に基づく新しい光度の単位 (ブージ・ヌーベル) の定義を採択する方針自体は、1937年の時点で固まっていたが、第二次世界大戦の影響により、1948年まで延期された。1948年の第9回CGPMにおいて、

「ブージ・ヌーベルの大きさは、白金の凝固温度における完全放射体の輝度が 1 cm^2 あたり 60 ブージ・

ヌーベルになるような量に相当する」
という 1937 年に提案された定義が採択され、さらに翌年、ブージ・ヌーベルに代わる新しい単位名称として Candela (カンデラ, cd) とすることが CIPM で承認された¹⁸⁾。(注:ブージ・ヌーベルは日本語では新燭と称されていた)

その後カンデラは、1960 年に国際単位系 (SI) 基本単位の一つとなり¹⁹⁾、定義の明確化のための見直しが提案され、

「カンデラは、101 325 N m⁻² の圧力の下での、白金の凝固点の温度における黒体の 1/600 000 m² の表面の垂直方向の光度である」

という定義に、1967 年の第 13 回 CGPM で修正された²⁰⁾。

白金点黒体標準器に基づくカンデラの定義は、酸化トリウムという放射性物質を使うことに起因する開発・運用の困難さや、国際比較での仲介器として用いられる標準電球と比較すると安定性が著しく悪いことなどから、実際には、カンデラを実現できる国家計量標準機関は極めて少なく、より実現性が高く高精度な実現が可能な方法について研究が進められた。その方向性は、「特定の光源に依存しないカンデラの定義の実現」であり、そのアプローチとして、電力置換型放射計を用いた放射束の絶対測定により、放射量と測光量の関係を求める方法が提案された。日本でも電子技術総合研究所 (電総研) が独自の電力置換型放射計を開発し、 $V(\lambda)$ に合致した分光応答度を有する放射計に基づく測定により、最大視感効果度 K_m を 683 lm W^{-1} と求めた²¹⁾。その後、測光・放射測定諮問委員会 (CCPR) において幾つかの国家計量標準機関から報告された K_m の測定結果を総合し、最良推定値として最終的に、当時の電総研が得た値と同じ値である $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ が CIPM で採用された²²⁾。一連の研究成果を踏まえて、1979 年の第 16 回 CGPM において、新たなカンデラの定義として、

「周波数 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ の単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/683 \text{ W sr}^{-1}$ である光源の、その方向における光度」

が採択された²³⁾。3.1 で述べたとおり、上記の定義を、その意味を全く変えることなく、普遍的な定数によって定義する表現へと修正したものが、最新のカンデラの定義である。

最新の定義を含め 1979 年以降のカンデラの定義の基本的考え方は、特定の単色放射に対して、放射束と光束の間に成立する一定の数値関係を定義することであり、この点からは、光束を基本単位とする方が直感的である。また、2.1 および 2.2 で述べたとおり、測光量および放射量の体系上では放射束が最も単純

な単位であり、放射束を基本単位とする考え方も成り立つ。しかしながら、冒頭に述べたとおり、視覚刺激を定量化する手段として人間の眼が光源を直視した状況をモデル化した測定に端を発し、脈々と受け継がれてきた光度という量が我々の生活に与える影響は極めて大きく、その実用上の意義、歴史的な蓄積などを勘案し、単位系の組み立てが改良されることによる混乱を避ける意味も含め、カンデラが現在も SI 基本単位の一つとして維持されていることは、測光・放射測定に係る単位を考える上で忘れてはならない、重要な側面である。

3.3 カンデラの定義に基づく測光量の考え方

1979 年にカンデラの定義が決議された時点では、国際単位系 (SI) の枠組みの中で、カンデラやルーメンなどの測光量の単位を与えることができる量は、波長に対する重み付けの関数として 2.1 で示した $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ を用いた場合に限られていた。一方で、CIE は人間が持つ複雑な視覚効果に関する多くの研究成果をまとめており、 $V(\lambda)$ や $V'(\lambda)$ とは異なる分光視感効率率も勧告している。こうした分光視感効率率関数に対する重み付けを加味した量を SI の中で取り扱う必要性は、1979 年の決議の中でも謳われている。

カンデラの実現方法は、CCPR が作成した “*Mise en pratique*” 文書²⁴⁾ にまとめられているが、より具体的な SI での測光量の単位の運用について定めた通則文書²⁵⁾ が CCPR と CIE の合同文書として出版されている。この通則文書の改訂版 (2019 年 5 月以降に出版予定) では、 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ 以外の分光視感効率率関数に対象を拡張した、測光量の取り扱いが記載されることになっている。さらに、測光通則の改訂版の内容を踏まえて、近い将来、CIE 物理測光システムを定めた国際規格⁴⁾ も改訂される予定である。

拡張された取り扱いの代表例は、明所視と暗所視との間の輝度レベルに相当する薄明視領域での分光視感効率率の取扱いについてである。CIE は、長年の研究成果をまとめ 2010 年に CIE 薄明視測光システムを提唱した²⁶⁾。これは、網膜中の錐体細胞と桿体細胞の双方が、輝度レベルに応じて一定の割合で寄与する視覚モデルに基づいており、 0.005 cd m^{-2} から 5 cd m^{-2} の間にある薄明視領域での分光視感効率率関数を、下記のように輝度レベルに応じて $V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$ の線型結合によって、

$$V_{\text{mes};m}(\lambda) = \frac{1}{M(m)} \{m \cdot V(\lambda) + (1-m) \cdot V'(\lambda)\} \quad (13)$$

と与えるものである。ここで、 m は順応係数、 $M(m)$ は規格化関数で $V_{\text{mes};m}(\lambda)$ が 1 になるように選ばれる。順応係数 m は、順応輝度レベルに応じて逐次計算に

より導かれる²⁶⁾。

薄明視の分光視感効率関数 $V_{mes; m}(\lambda)$ に基づく測光量は、3.1 と同じ考え方にに基づき、例えば薄明視光束 $\Phi_{mes; m}$ は、

$$\Phi_{mes; m} = \frac{K_{cd}}{V_{mes; m}(\lambda_{cd})} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_{mes; m}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (14)$$

と導出され、単位はルーメン (lm) である。ここで、 $\Phi_{e,\lambda}$ は分光放射束、 $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ である。図 4 に薄明視領域における順応係数 m に依存した分光視感効率度の変化を示す。3.1 で示した考え方と同様に、 $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ で $K_{cd} = 683 \text{ lm W}^{-1}$ に一致するように規格化されており、各々の m の値に対応する分光視感効率度のピークが測光量の導出に必要な最大視感効率度を与える。ここで、CIE 薄明視測光システムは、周辺視における視作業性に関する実験に基づき導かれた概念であるため、中心視の条件には適用できない点に注意が必要である。中心視に対応した測光量の導出には、輝度レベルによらず $V(\lambda)$ が用いられる。

このほか、図 5 に示す、前述の中心視より広い視角を加味した 10 度視野分光視感効率率 $V_{10}(\lambda)$ ²⁷⁾ は、特に色の評価に関連して用いられているが、上記と同様な考え方で測光量の単位が与えられ、測定量は 10° 光束 (他の測光量も同様) と称する。さらに研究用途に限定すると、色覚細胞の波長応答特性の研究に基づき波長 460 nm より短波長域の $V(\lambda)$ の値を見直した分光視感効率関数 $V_M(\lambda)$ ²⁸⁾ や (図 5 参照)、CIE が勧告したその他の分光視感効率関数²⁹⁾ も、加法性が成立する場合、使用した関数を明示することを条件に、同様の扱いが認められている。

ただし、網膜応答に由来する刺激であっても、非視覚的效果に対して測光量の単位は使用できない。これは測光・放射測定分野においては、視覚刺激に由来する量のみが、その重要性を鑑み特

別に SI の中で固有の単位を与えられていると言うことである。光放射が与える光化学的および光生物学的作用は数多く存在し、その中には人体に大きな影響を与えるものも少なからず含まれている (例えば、紅斑、青色光網膜傷害、網膜熱傷害など³⁰⁾) が、こうした光化学的・光生物学的な作用量を光放射の観点で定量化する際には、分光放射量を対象となる効果 (の波長依存性) を与える作用関数で重み付けした放射量として表現する。例えば次式のように、作用関数 $Z(\lambda)$ を加味した放射束 $\Phi_{e,z}$ を求める場合には、分光放射束を $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ とすると、

$$\Phi_{e,z} = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot Z(\lambda) \cdot d\lambda \quad (15)$$

と表され、単位は W である。放射量の単位を用いることから、特に異なる作用関数を用いた結果を比較する際には、使用した作用関数を明示することが不可欠である。

4 日本の測光・放射標準

4.1 カンデラの実現方法

4.1.1 カンデラの定義と実現

かつてのカンデラの定義は、白金点黒体標準器を実現しない限り自ら単位を設定できず、その実現が極めて困難であったのに対し、現行の定義では、特定の周波数の光放射に対する放射量と測光量の数値関係が根拠となっており、一次標準としての実現方法の選択肢が増え、不確かさの低減の可能性が増したことに大きな意味がある。ここでは、カンデラの定義に基づき光度の単位を実現する方法について説明する。分光視感効率関数を加味した心理物理量という SI の中で得意な位置付けを持つこともあり、現行の定義内容と相まって、異なる単位を経由する一見複雑な実現方法となる点が特徴である。

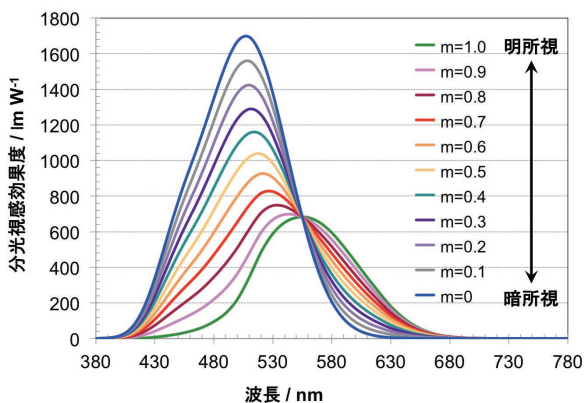


図 4 薄明視測光システムにおける分光視感効率関数

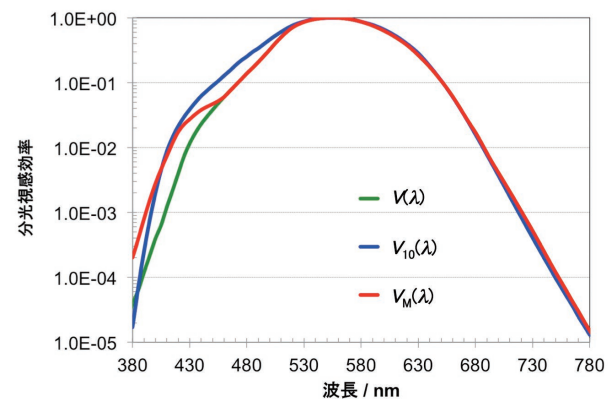


図 5 CIE 物理測光システムで使用されるその他の分光視感効率関数の例 (縦軸は対数表示)

4.1.2 極低温放射計による放射束の絶対測定

カンデラの定義に基づき光度の単位を実現する方法として様々な方法が研究されてきたが、主流となっているのは、電気標準に基づく電力との比較により放射束を決定する手法で、1990年代中頃から液体ヘリウム温度の環境下で熱型の光吸収体を動作させる極低温電力置換型絶対放射計（以下、極低温放射計）³¹⁾が用いられている。日本では1994年に電総研(当時)が極低温放射計を導入し、現在も測光・放射測定の一次標準として運用されている³²⁾。

図6に極低温放射計の外観および受光キャビティの概略を示す。液体ヘリウムタンクの内部に受光キャビティが設置されており、外部から放射束と電力を交互に与えることができる。入射した放射束 Φ_e (W)の吸収に伴う受光部の温度上昇と、直流電流印による電力 P (W)による受光部の温度上昇とが等しくなるように、与える電力を調整することにより、当該電力を電気標準にトレーサブルになるように決定すれば、放射束を高精度に校正可能である。

極低温放射計では、入射放射束と電力の等価性の成立が前提であり、そのために、極低反射体をアスペクト比の高い円筒形状の内面に施したキャビティ構造を有する光吸収体を用いることで99.99%を超える高い吸収率を実現している。さらに、熱絶縁性の高い超伝導材をヒータ配線に用いることで、給電回路での電力損失を抑えつつ、電力を与えるためのヒータの発熱がリード線を通して受光キャビティ外に流出する熱損失を抑えている。さらに、液体ヘリウム

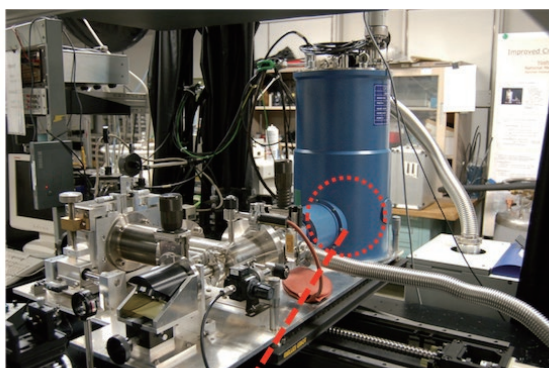


図6 極低温放射計の外観（上）および受光キャビティの概略（下）

温度で動作させることにより、周辺から光吸収体への熱放射の影響も抑制されるほか、極低温環境下では物質の比熱が小さくなるため温度測定の感度向上も実現している。

4.1.3 光放射検出器の分光応答度校正

4.1.2に基づき絶対校正された放射束 Φ_e を持つレーザ放射を、光放射検出器（以下、検出器の略）に入射させてその出力電流を測定することにより、分光応答度 (A/W) を求めることができる。分光応答度は検出器への入射放射束に対する感度を表す量であり、分光応答度が値付けされた検出器を用いることで、様々な光源の測定が可能になる。

しかし、極低温放射計に基づき決定される放射束 Φ_e は、測光・放射測定の中で最も不確かさが小さく、0.01%のオーダーも実現可能であるが、前述のとおり極低温放射計の動作には特殊な条件が必要であるため、測定対象となる放射束には、高い指向性およびビームクオリティが求められるため、実質的にレーザからの光放射にほぼ限られてしまう。さらに、測定可能な入射放射束の範囲（パワーレベル）にも制限がある。このため、検出器の分光応答度は、特定の波長、特定のパワーレベルでしか得られない。このため、測光・放射測定で一般に対象とするような、多様な分光分布を有する光源の測定に供するためには、放射束レベルの拡張および波長範囲の拡張が必要となる。

限られたパワーレベルでの校正結果を範囲外に拡張するためには、使用する検出器の応答がどの程度のパワーレベルまで直線的な振る舞いをするか（応答非直線性）を知ることが必要不可欠である。図7に重畳法に基づく応答非直線性測定の概略を示す³³⁾。重畳法では、放射束のほぼ等しい2つの光放射 (Φ_{e1} および Φ_{e2}) を交互に入射させ、検出器からの出力信号 S_1 、 S_2 を測定する。次に、2つの光放射を同時に入射 ($\Phi_{e1} + \Phi_{e2}$) させた際

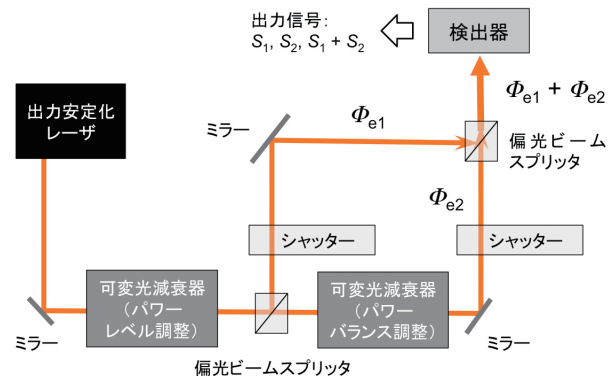


図7 重畳法による応答非直線性の測定

の出力信号 S_{1+2} を測定し、これらの比較から、放射束と検出器出力の間の直線性の程度が評価される。このとき、検出器の応答非直線性 F_{NL} は、

$$F_{NL} = \frac{S_{1+2}}{S_1 + S_2} - 1 \quad (16)$$

で与えられる。(16)式に基づく評価を、パワーレベルを変えながら繰り返すことで、各パワーレベルでの応答非直線性 F_{NL} が得られる。特定のパワーレベルでの分光応答度の校正結果に k_{NL} を加味することで、広いパワーレベルへと測定可能範囲を拡張することができる。産業技術総合研究所（産総研）では、可視・近赤外域のレーザ波長点において7桁超のパワーレベルで応答非直線性の評価が可能³⁴⁾である。

分光応答度の校正対象としては、シリコンフォトダイオードが用いられることが多い。特に、複数のシリコンフォトダイオードを内蔵し、互いに表面反射を入射させるような三次元配置とすることで、検出器全体としての反射率をゼロに近づけ、可視波長域では外部量子効率がほぼ100%となるように設計されてトラップ型光検出器（図8(a)）が、理想的な特性を有する検出器として、測光・放射測定における仲介標準器として用いられている³⁵⁾。

波長範囲の拡張については、シリコンフォトダイオードの場合、可視域における分光応答度の理論モデルの研究が成熟しており^{36),37)}、レーザ波長点に対して得られた離散的な分光応答度をモデル関数に最少二乗フィッティングすることで、可視域の全域に渡つ

て分光応答度を求めることができる。さらに、モデル関数に基づく方法に加えて、ランプ等の白色光源と分光器を組み合わせた、ほぼ単色で平行な光放射を発生可能な分光光源装置を用いて、極低温放射計を用いてレーザ波長点で分光応答度が校正されたトラップ型検出器を、応答特性の波長依存性が極めて少ない検出器（例えば熱型検出器）と比較することで、レーザ波長点以外での分光応答度を導くことができる。熱型検出器に基づく方法は、特に、モデル関数の適用が困難な紫外域および近赤外域への波長範囲の拡張でも用いられる。

このようにして分光応答度の校正波長範囲が拡張されたトラップ型検出器は、分光応答度標準として、比較測定に基づく分光応答度の校正基準として用いられている。なお分光応答度の比較測定は、分光光源装置から発せられる単色放射を用いて、出射波長を選択してトラップ型検出器と校正器物とに交互に照射し、その出力信号を比較測定することで行われる。

4.1.4 光度標準の設定

4.1.3に基づき、可視域において分光応答度が校正された検出器（シリコンフォトダイオード）が得られる。これに面積既知の精密アパーチャと標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ 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）を組み合わせて、測光用の標準検出器（ $V(\lambda)$ 受光器）を構成する（図8(b)参照）。この時、 $V(\lambda)$ 受光器の基準面（精密アパーチャのエッジ部に相当）の照度 E_v (lx) に対応する応答（出力電流）を i_0 (A) とすると、 $V(\lambda)$ 受光器の照度応答度 s_v (A/lx) は、

$$s_v = \frac{i_0}{E_v} = \frac{A \int_0^\infty \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^\infty \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (17)$$

と表される。ここで、 $s'(\lambda)$ は分光応答度標準に基づいて校正された $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度 (A/W)、 A は、精密アパーチャの面積 (m^2)、 $\Phi_{rel,\lambda}(\lambda)$ は測定対象の相対分光分布（分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ の相対値）、 K_m は最大視感効果度である。(17)式の分母は、測定対象から精密アパーチャ面上に放射される光束 (lm) に相当し、それを精密アパーチャの面積で除することで照度 (lx) となる。分子の積分記号の中は、同じ光束に対する $V(\lambda)$ 受光器からの出力電流 (A) である。

2.2で述べたとおり、照度はある面要素に入射する光束の面密度であり、直接には光源の放射特性に関する情報を与えないが、光度 (cd) が点光源を前提に定義されている量であることから、照度 (lx) との間に、

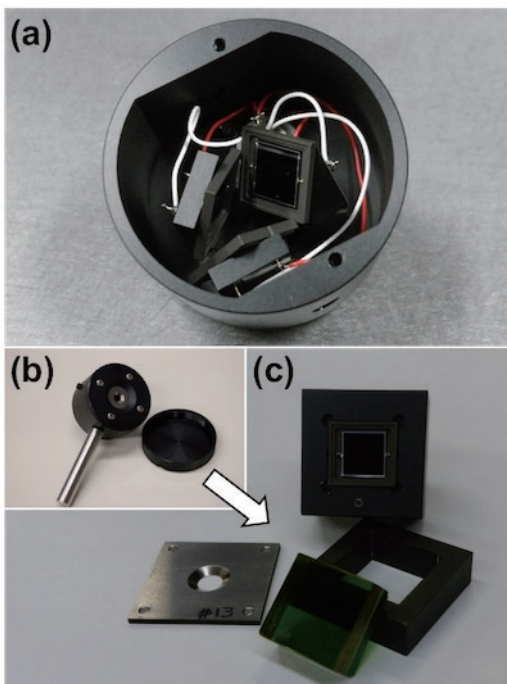


図8 (a) トラップ型検出器（三素子反射型）、 $V(\lambda)$ 受光器の (b) 外観および (c) 構成

$$E_v = \frac{I_v \cdot \cos\theta}{d^2} \cdot \Omega_0 \quad (18)$$

という関係が成立する。ここで d は光源の発光点から $V(\lambda)$ 受光器の基準面までの距離（測光距離 m）、 Ω_0 は単位立体角（1 sr）、 θ は光軸と受光器法線との角度である。(18) 式の関係 inverse square law と言い、測光・放射測定分野において広く用いられる基本法則の一つである。(17) 式および (18) 式に基づき、 $V(\lambda)$ 受光器で得られた照度の測定値から、対象光源の光度が求められる。

産総研におけるカンデラの実現は、図 9 に示すように、照度応答度 s_v (A/lx) が値付けされた $V(\lambda)$ 受光器 (図 8 (b)) を用いて、光度標準電球 (図 10) によって与えられる照度を、所定の測光距離 d (m) で測定することによって行われている^{38)~40)}。

1879 年のエジソンによる白熱電球の発明以降、性

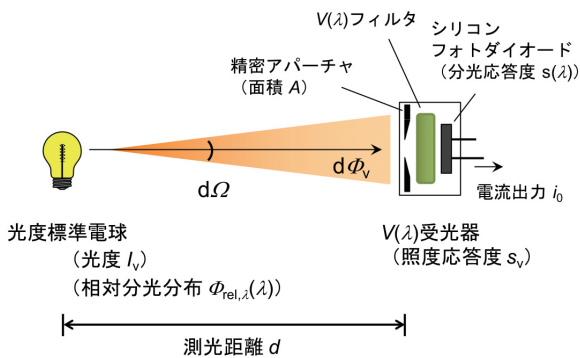


図 9 $V(\lambda)$ 受光器に基づくカンデラの実現

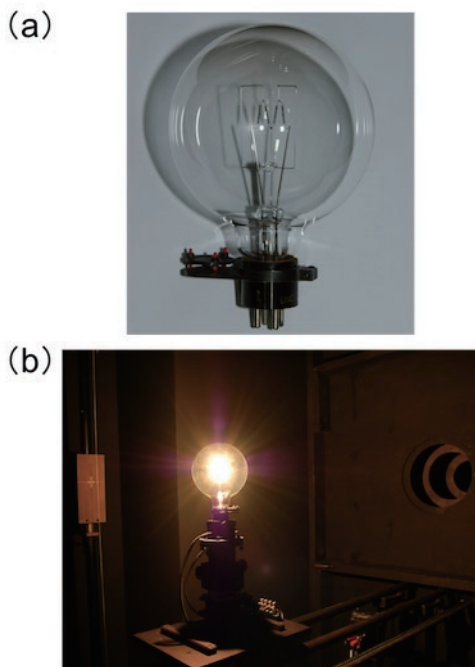


図 10 光度標準電球の (a) 外観、および (b) 測光ベンチ上での点灯時の様子

能改善や特性評価が順次進められ、20 世紀初頭に炭素フィラメント電球が、1930 年頃にタングステンフィラメント電球が光度値を維持する標準電球として用いられるようになった。日本は、高性能な標準電球の開発にこれまで大きな貢献を果たしてきており⁴¹⁾、現在でも、光度をはじめとする主要な測光・放射標準を維持し、比較測定における仲介標準器として広く使われている。図 10 は産総研で用いられている光度標準電球 (55 V-330 W 型) である。

現在、日本の光度標準の相対拡張不確かさ ($k=2$) は 0.58 % である。また、標準値の国際整合性については、基幹比較 (CCPR-K3.a) において、国際参照値 (Key Comparison Reference Value: KCRV) に対して -0.09 % という良好な結果が得られている⁴²⁾。

(17) 式の照度応答度の算出で用いる相対分光分布には、一般照明用のタングステンフィラメント電球の相対分光分布を代表する CIE 標準イルミナント A の値が用いられる。これは、約 2 856 K の温度における黒体放射に由来する⁴³⁾。このため、カンデラの実現に用いられる光度標準電球は、CIE 標準イルミナント A に近似した相対分光分布を有する必要があるが、実際には僅かな差が生じる。また、一般の光源の測光においては、多くの場合、光度標準電球とは異なる相対分光分布を持つ光源が測定対象となる。測光に用いる $V(\lambda)$ 受光器は、理想的には標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ と相似形の分光応答度を有することが求められるが、光学フィルタとシリコンフォトダイオード等の検出器の組み合わせでこれを実現することは極めて困難であり、一部の波長域で僅かな差を生じる。この分光応答度の差は、上記の相対分光分布の差を反映して測光誤差を与えるため、下記で求められる色補正係数 C を考慮する必要がある。

$$C = \frac{\int_0^\infty \Phi_{rel,s,\lambda}(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda \times \int_0^\infty \Phi_{rel,t,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{rel,s,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \times \int_0^\infty \Phi_{rel,t,\lambda}(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (19)$$

ここで、 $\Phi_{rel,s,\lambda}(\lambda)$ 、 $\Phi_{rel,t,\lambda}(\lambda)$ はそれぞれ光度標準電球と被校正対象光源の相対分光分布、 $s'(\lambda)$ 、 $V(\lambda)$ はそれぞれ $V(\lambda)$ 受光器の相対分光応答度と標準分光視感効率関数である。

4.2 その他の主要な測光・放射標準

4.2.1 標準量の組み立て・拡張

光放射の測定では、波長、空間、時間の広がりや考慮した様々な測定量が必要であり、それらが相互に関連して、組み立て量の関係を構築している。各々の組み立て量の実現には、上記の 3 要素を加味した拡張が必要であり、カンデラから都度、これらの単位を組み立てることは実用的見地から得策ではない。

また、パワーレベルなどの違いも考慮する必要がある。このため、測光・放射測定で必要とされる主要な測定量について、対応する標準を設定し、仲介標準器に値を維持し、校正体系を構築することが重要である。以下、主要な測光・放射標準の実現に関して述べる。

4.2.2 黒体放射炉に基づく分光放射標準

分光放射量は波長微分に相当する量であるため、検出器に値づけられた分光応答度からこれを求める場合には、所定の波長前後の狭い波長幅の放射のみを切り出し、波長幅 0 の極限での (放射束/波長幅) を求める必要があるが、条件に合致した理想的な特性を持った検出器の実現は現実的でない。このため分光放射量に関する測定の基準としては、 nm^{-1} の次元をもつ標準が必要であり、多くの場合、黒体放射が用いられている。黒体放射からの分光放射輝度 $L_{e,\lambda}(\lambda)$ は、プランクの放射則に基づき黒体の温度を決定する事で一意に決まり⁴⁴⁾、以下の式で表わされる。

$$L_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (20)$$

ここで h はプランク定数 (J s)、 c は光の速度 (m s^{-1})、 k はボルツマン定数 ($\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$)、 T は黒体の温度 (K) である。図 11 (a) は、(20) 式から導かれる分光放射輝度を示しており、黒体の温度が高いほど分光放射輝度のピーク強度は増大し、かつピーク波長は短波

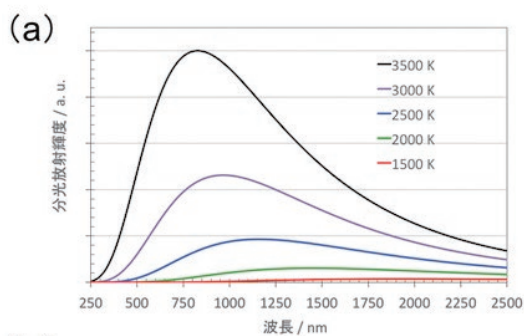


図 11 (a) 温度の異なる黒体からの分光放射輝度の比較、および (b) 高温黒体放射炉の外観

長側にシフトし、測光・放射測定で良く用いられる紫外・可視・近赤外域の測定に適した条件に近づくことが分かる。

図 11 (b) に、産総研が保有する高温黒体放射炉の外観を示す。炉心部分に開口が狭く奥行きの高い高アスペクト比な構造を有する黒鉛製の放射体が設置されており、3 000 °C 近傍までの温度上昇が可能である。

分光応答度が校正された検出器を用いた、国際温度目盛 (ITS-90) による銅の凝固点などの温度既知の定点黒体放射炉との比較により、(20) 式に基づき高温黒体放射炉の温度を決定できる⁴⁵⁾。そして、黒体放射炉の温度とプランク放射則により、分光放射照度標準に代表される、紫外・可視・近赤外の波長域での分光放射量の一次標準となる。

4.2.3 配光測定に基づく全光束、分光全放射束標準

全光束は、全空間に放射される光束すべてを測定対象とした、光源の特性を表す基本的な測光量であり、単位はルーメン (lm) である。高精度な全光束の測定値は、省エネルギー性能の指標となる光源効率 (ある光源に投入した電力に対する全光束の比) を評価する際に必要不可欠である。

全光束は、1) 光源を中心とした球面上における照度の積分値、または 2) 立体角 $4\pi \text{ sr}$ にわたる光源からの光度の積分値、という形で表現される。ここで、図 12 (a) のような光源の中心から一定距離の仮想球

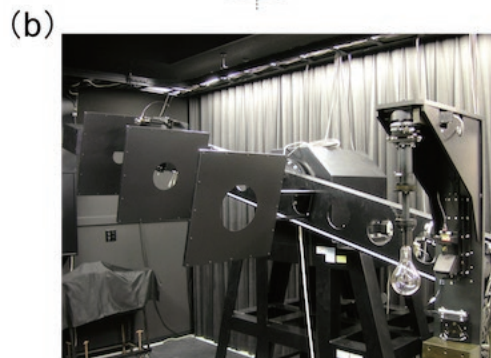
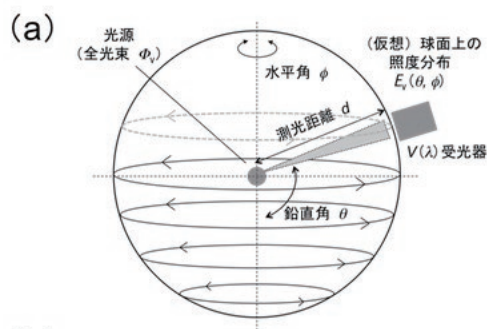


図 12 (a) 照度の空間積分のイメージ、および (b) 配光測定装置の外観

面を考え、その球面上での照度分布を $E_v(\theta, \varphi)$ とすると、球面上の微小面積 dS に入射する微小光束 $d\Phi_v$ を用いて、光源の全光束 Φ_v は、

$$\begin{aligned} \Phi_v &= \int_S E_v \cdot dS \\ &= d^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E_v(\theta, \varphi) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (21) \end{aligned}$$

と照度の積分の形で与えられる。ここで、 d は光源から測定点までの距離 (m) である。また、(21) 式は、逆二乗則を用いて、測定対象となる光源の光度を全空間 (4π sr) の方向で積分する表式に変換することもできる。言い換えると、全光束は、光度または照度から導かれる組み立て量と位置付けられる。

(21) 式の原理の実現には、配光測定装置と呼ばれる、 $V(\lambda)$ 受光器を空間的に挿引することで、測定対象光源によって与えられる照度分布 (または測定対象光源の光度の空間分布) を求める装置が用いられる。図 12 (b) に、産総研が保有する配光測定装置^{46),47)}の外観を示す。この配光測定装置はアームの一端に測定対象光源 (例: 全光束標準電球) を、もう一方の終端部に $V(\lambda)$ 受光器を設置する。光源中心から $V(\lambda)$ 受光器の基準面までの距離 (測光距離) は 2.7 m である。アームの回転によって $V(\lambda)$ 受光器が光源を中心とした鉛直面内を移動するほか、独立した別の回転機構により、光源が自身の中心軸周りを水平回転する。また、光源設置部には、回転アームの鉛直回転に同期した逆回転 (補正回転) の機構があり、光源の姿勢は常に鉛直下向きで一定に保たれる。これにより、光源を中心とした半径 2.7 m の球面状の照度分布が計測可能である。(21) 式に基づいて、水平角周りの対称性や所定の角度ステップ内での一様性を仮定し、 $V(\lambda)$ 受光器によって離散的に得られた各空間位置での照度値を空間積分することで全光束が導出される。

これまで、白熱電球に代表される従来光源の全光束測定では、標準光源と被校正光源の相対分光分布の差異が比較的小さいことを前提として、4.1.4 で示した色補正係数を加味した校正が主流であった。しかし、従来光源に代わり普及が急速に進んでいる LED 照明では、素子や蛍光体の組み合わせに依存して多種多様な相対分光分布の製品が存在し、色補正係数のみでは正確な測定が困難である。こうした状況下では、分光測定に基づく分光全放射束標準が必要となる。

分光全放射束標準 ($W \text{ nm}^{-1}$) は、全光束標準と分光放射照度標準を組み合わせることで実現されている⁴⁸⁾。具体的には、 $V(\lambda)$ 受光器の代わりに分光放射計を配光測定装置に設置し、分光放射計の応答関数

を、分光放射照度標準に基づき校正する。この校正結果に基づく配光測定を行うことで、測定対象光源によって生ずる相対分光放射照度 $E_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ の空間分布が得られるので、それらを (21) 式と同様の原理で空間積分することで、相対分光全放射束 $\Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ となる。

分光全放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ と相対分光全放射束 $\Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ との関係は、係数 a を用いて、

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda) = a \times \Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda) \quad (22)$$

と表されるので、分光全放射束の絶対値を求めるためには、係数 a が分かれば良い。ここで、測定対象光源の全光束 Φ_v と、相対分光全放射束 $\Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ の関係を考えると、(3) 式に基づき、

$$a = \frac{\Phi_v}{K_m \int_0^{\infty} \Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (23)$$

となり、(22) 式と (23) 式から分光全放射束標準が実現される。

4.2.4 カロリメータに基づくレーザパワー標準

測光量および放射量の体系上、最も単純な単位を持つ量は放射束 Φ_e で、その単位は W である。前述の通り、測光・放射標準を構築する上において、放射束の絶対測定技術の果たす役割は極めて大きく、現行のカンデラの定義に基づく実現方法の第一ステップとなっている。こうした重要性に加えて、単色性が高く、位相・偏光・放射の広がりなどの波に関わる諸特性が制御された光源であるレーザに対する高精度な放射束測定は、レーザの最も重要な性能評価指標を得る手段として必要不可欠である。しかし、4.1.2 で示した極低温放射計は、レーザからの放射束 (レーザパワー) の絶対測定の用に供されるものであるが、測定可能な入射放射束レベルに制限がある。

そこで、極低温放射計では対応が難しい高いパワーレベルに対応したレーザパワー測定を可能とするための一次標準として、常温型の電力置換式熱型検出器 (レーザカロリメータ) が用いられる。図 13 に産総研がレーザパワー測定の一次標準として用いている、円筒型吸収体を持つ等温制御型レーザカロリメータ⁴⁹⁾の外観および測定原理の概要を示す。

図 13 では、熱電冷却素子に加える冷却パワーとヒータに加える電力のバランスを取り、受光部を等温制御している。この状態でレーザを入射すると、受光部での光吸収により受光部の温度が上昇して等温状態が崩れるが、ヒータに与える電力を減少させ、入射したレーザパワーとヒータ電力の和が冷却パワーと等しくなるようにフィードバック制御して等温状態を維持させる。入射したレーザパワーの絶対値は、ヒータに与える電力の変化分に相当する。また、円

筒型吸収体の先端部と底部に取り付けられたヒータは、円筒内で反射した後吸収されるレーザーパワーと電力の等価性を評価する機能を果たしている。

レーザーに係る高精度な放射測定は、空間に放射されるレーザーのパワー測定のみならず光ファイバを経由した系での測定や、パルスレーザーに対する時間応答を加味した評価が求められているほか、加工用の大出力レーザーから通信用などの微弱光まで、放射束測定に求められるパワーのダイナミックレンジが極めて広く、測定対象も多岐に渡っている^{50)~52)}。上述の方式で得られたレーザーパワー標準に基づき、これら一連のレーザー放射測定に係る標準の拡張が行われている。

5 測光・放射標準に関する最近の話題

5.1 光子数検出に基づくカンデラの実現に向けて

前述のとおり、光度のSI単位であるカンデラ(cd)は、2018年11月のCGPM決議により、周波数 540×10^{12} Hzの単色放射の視感効果度 K_{cd} を683 lm/Wと定義する表現に修正された。3.1で述べたとおり、今回表現が修正された定義は、1979年に決議された従前の光度単位の定義と同義であり、放射量と測光量を対応付ける定数である視感効果度 K_{cd} の値を一義に定めることで、絶対放射測定に基づいて光度単位を実現することを意図したものである。一方で、光度単位をはじめとする測光・放射測定に係る単位を実現するための考え方として、CCPRにおいて、絶対

放射測定に基づく方法に加えて、光子数に基づいた実現方法への言及がなされている点に注目する必要がある⁵³⁾。

空気中の波長 λ における、ある分光放射量 $Q_{e,\lambda}$ と対応する光子数に基づく量 $Q_{p,\lambda}$ との関係は、

$$Q_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot n_a(\lambda) \cdot Q_{p,\lambda}(\lambda) \quad (24)$$

で表される。ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 $n_a(\lambda)$ は波長 λ での空気中での屈折率である。これより、対応する測光量 Q_v との関係は、 K_{cd} および所定の分光視感効率関数 $V_x(\lambda)$ 、 $\lambda_{cd} = 555.017$ nmを用いて下記の式で表される。

$$Q_v = \frac{K_{cd} \cdot h \cdot c}{V_x(\lambda_{cd})} \cdot \int_0^\infty Q_{p,\lambda}(\lambda) \cdot \frac{n_a(\lambda) \cdot V_x(\lambda)}{\lambda} \cdot d\lambda \quad (25)$$

言うまでもなく、上記の原理に基づいて測光・放射測定に係る単位を実現しようとする場合、第一義的に必要な計測技術は、光子数の精密計測となる。こうした背景から、現在、世界の主要な国家計量標準機関において、高精度な光子数計測技術の開発に関する研究が盛んに進められている。ここでは、産総研が取り組んでいる、超伝導転移端センサ(Superconducting Transition Edge Sensor: TES)に基づく単一光子検出技術の研究について紹介する。

光放射は波としての側面と粒子としての側面を併せ持ち、光放射の周波数を ν (s^{-1})とすれば、光子1個の持つエネルギー E (J)は、プランク定数 h (J s)を用いて $E = h\nu$ で表される。よって、単位時間当たり到達する光子数をカウントし、 $h\nu$ を乗じれば放射束 Φ_e (W)を求める事が可能となる。光子数計測技術は近年著しい発展を見せており、このような背景から、光子数を元にした放射束標準の実現やSI単位改訂を目指した研究が各国で進められている。

図14に、TESによる光子検出の原理を示す。TESも極低温放射計と同じく光によって生じた熱的な擾乱を検出原理とするが、極低温放射計では、入射した放射束をパワー(W)として計測するのに対し、TESは入射した光子列のエネルギー(J)を計測する点に違いがある。TESは、ある臨界温度で超伝導転移を起こす金属薄膜から構成され、平衡状態では図14(i)のようにTESの動作温度が常に超伝導転移領域にあるように調節されている。(i)の状態では光子がTESに入射して吸収されると、光子の持つエネルギー E によりTESの温度が上昇し、図14(ii)の状態へと移行する。この温度変化によりTESの抵抗は大きく変化し、これを外部電子回路で読み出すことによって光子検出の信号を得る。TESは典型的に数10 μ m角の有感面積を持ち、その熱容量は微小であることから、単一光子を十分なエネルギー分解能で観測で

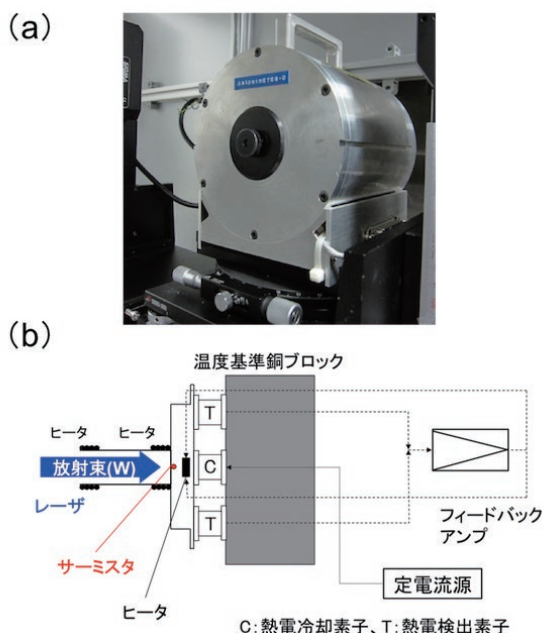


図13 レーザパワー測定用カロリメータ
(a: 外観、b: 測定原理の概要)

きる能力を持つ。TES の温度が転移領域にある限りは、抵抗変化量は入射した光パルスのエネルギーに比例するため、単一波長の光パルス列を観測では光パルス中の光子数を、単一光子の観測ではその振動数や波長を識別できるのが TES の大きな特徴である。

光子検出器の応答度（1 個の光子に対して必ず 1 個の信号を出力するか、数え落としはどの程度発生するか）の評価、測定器や電子回路の応答速度（人間の視覚に対して放射が与える影響が最大になる周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に対する光子 1 個のエネルギーは 3.58×10^{-19} J で、一般的な放射測定での放射束レベルの下限である nW レベルでも、1 秒間に到達する光子は 10^9 個のオーダーとなる）など、SI 単位改訂に向けてはいくつかの課題がある。その克服に向け、光子検出器の応答度測定に関する国際標準化、

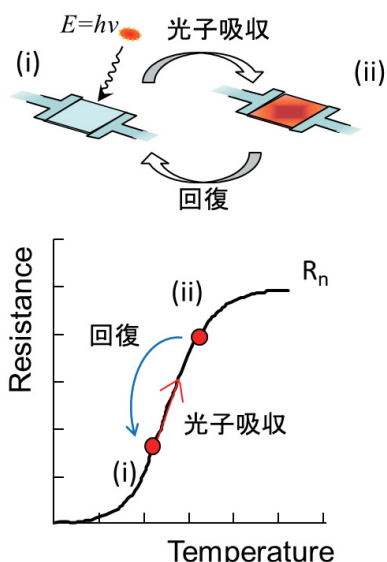


図 14 超伝導転移端センサ (TES) による光子検出の原理 (上) および TES 抵抗値の温度依存性の概念図 (下) (i) : 平衡状態、(ii) : 光子吸収により TES 温度が上昇した状態

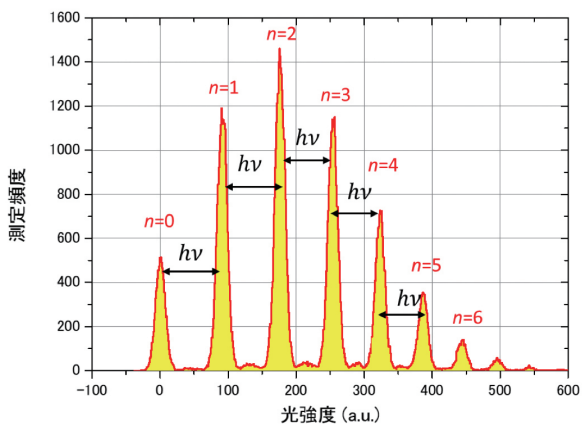


図 15 超伝導転移端検出器 (TES) による光子数測定結果の一例

単一光子の検出効率に関する国際整合性検証⁵⁴、光子数から実用光強度へのトレーサビリティ確立に向けた、TES を電熱置換に応用した pW から μ W レベルの新しい極低温放射計の開発^{55,56} など、現在、様々な取り組みが行われており、今後が期待される技術である。

図 15 は、産総研で開発した TiAu 近接二重層 TES による光子数識別器⁵⁷により、単一波長 1550 nm のパルスレーザの弱コヒーレント光を測定した結果で、横軸は到達した光子のエネルギー、縦軸は到達イベント数を表す。弱コヒーレント光パルスでは、各光パルス中の光子数は、量子力学的な要請から光源側に光子数についてのショット雑音が生じ、その光子数は Poisson 分布となることが知られている。すなわち、弱コヒーレントパルス光の平均光子数を μ とすれば、その分散を μ とした光子数 n を含むパルス列が TES に到達することになる。単一光子のエネルギーは $h\nu$ で量子化されているから、TES はその整数倍であるエネルギー $E = n \times h\nu$ を計測することになる。よって、図 15 の各ピークは、左端を $n = 0$ として、右に向かって順に $n = 1$ から最大 8 程度までの光子数を含む光パルスを計測したことを示している。このように、TES を用いると光源の光子数状態を明確に同定することが可能となる。図 15 の結果から、測定の平均光子数、パルスレーザの繰り返し周波数、TES 検出効率、レーザ波長が分かれば、観測した光放射の放射束を求めることが可能であり、この実験の場合ではおよそ 1.3×10^{-14} W の放射束を計測していることに相当する。

5.2 測光・放射測定用の標準光源の開発

測光・放射測定分野において標準光源の果たす役割は極めて大きい。標準光源は、光度、光束、分光放射照度など光源に由来する測定量に関して、絶対測定によって実現される標準値を安定に維持する役割を担っているほか、比較校正の際の基準に用いられており、トレーサビリティを介する仲介標準器（トランスファー標準）として必要不可欠である。また、国際比較において各国の標準値の整合性の程度を検証する際にも、相互比較の対象として標準光源が回覧されることが多い。

戦後から現在に至るまでの測光・放射測定において、標準光源は、タングステンフィラメントに基づく白熱光源の技術によって支えられており、特別な製造・選定プロセスを経た白熱電球またはハロゲン電球（以下、標準電球）がその主軸となっている。日本は標準電球の開発にこれまで大きな貢献を果たしており、特に、極めて良好な点灯再現性および長期的な安定性を有する測光用標準電

球の供給によって、国際的に高い評価を受けてきた⁴¹⁾。現在でも測光用標準電球は、国際比較用の仲介標準器や、標準値を維持するための実用標準として国内外で広く使われている。

こうした重要性に鑑み、産総研では、新たな測光・放射標準の開発に際し、その用途に適した標準光源の開発も行っている。ここでは、その代表的な成果を2つ紹介する。

4.2.3 で示した分光全放射束標準の開発にあたり、入手可能な市販のハロゲン電球に対して、点灯再現性・安定性、分光特性、配光特性、枯化処理による特性改善の程度などについて系統的な評価を行った。その結果、市販のハロゲン電球であっても、適切な枯化処理を施した上で選別することで、従来の測光用標準電球に比肩する特性を実現し得るものがあることを明らかにした。図16は、産総研が分光全放射束標準の仲介器として用いている標準光源である。これは、枯化処理および選定プロセスを経た24 V-150 W タイプのハロゲン電球と口金変換 (E11-E26) 用の専用ソケットで構成されている。典型的な出力特性は、6.25 A で定電流点灯制御したときの全光束は約3000 lm、相関色温度は約3000 K で、安定性・再現性は可視域 (360 nm から400 nm を除く) で約0.2 % である⁴⁸⁾。

さらに、LED 照明は、従来照明と比較してその分光分布・空間伝搬特性が極めて多様であるため、比較測定に基づく校正に際して、従来光源との分光特性・空間特性の差が課題となることが多い。分光測定に基づく校正の重要性については4.2.2 で示したとおりであるが、加えて、LED 素子は前面にのみ光を放射する特性を持っており、LED 照明においても前面のみに光を放射する配光を有する製品が多く存在することを考慮する必要がある。一般に積分球を用いた標準光源と被校正対象の比較測定では、図17に示すように、光源の設置方法により、従来光源と同様に光源を積分球の中心に設置する 4π 幾何条件と、光源を積分球の壁面に設置する 2π 幾何条件がある。このうち、 4π 幾何条件については、前述のハロゲン電球に基づく分光全放射束標準光源が校正基準として用いられている。

一方で 2π 幾何条件は、前面にのみ光を放射する光源の測定方法として適していることから、LED 照明の評価において特に重要視されている測定方法である。しかしこれまで、 2π 幾何条件に適用可能で、かつLED 照明の評価に適した特性を有する標準光源は存在しなかった。ここで標準光源に求められる重要な特性は、1) 前面にのみ光を放射する配光を有すること、2) 可視波長域全体で十分な光強度をもつこと、

の2点である。前者の観点からはLEDを用いた標準光源がふさわしいが、これまでに開発された白色LEDでは、可視域の短波長域および長波長域の光強度が不十分で、標準光源には適していなかった。

この問題を解決するため、産総研はLEDメーカーとの共同開発により、世界に先駆けて、 2π 幾何条件の分光全放射束測定に最適化された、LEDをベースとした標準光源 (標準LED) を開発した⁵⁸⁾。開発した標準LED (図18) は、中心の発光部の温度を一定に保つための温度制御機構を有し、周囲温度に対する光強度の変動が 1°C あたり0.01%以下と、従来型の白色LEDに比べ、約20倍の点灯安定性を実現しているほか、高い点灯再現性を有している。典型的な出力特性は、200 mA の定電流点灯において全放射束が約1300 mW、全光束が約200 lm である。また、スペクトル形状の最適化も行っており、中心波長

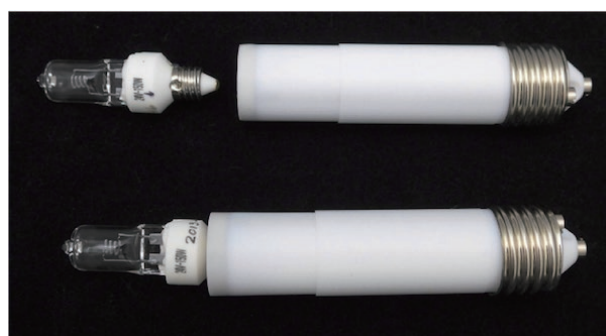


図16 分光全放射束標準光源 (24 V-150 W 型ハロゲン光源に口金変換 (E11-E26) ソケットを組み合わせたもの)

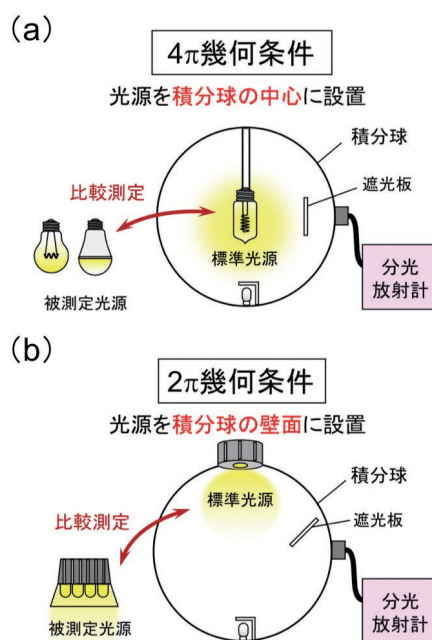


図17 積分球を用いた比較測定の幾何条件 (a: 4π 幾何条件、b: 2π 幾何条件)

が異なる複数の励起用 LED 素子を配置して、380 nm から 430 nm の波長域での光強度を改善するとともに、430 nm より長い波長域では、青、緑、赤の蛍光を発する複数の蛍光体を組み合わせた構造を導入した。これにより、従来型の白色 LED と比してスペクトル形状の凹凸を減少させて波長平坦性を高めると共に、380 nm から 780 nm の波長範囲で十分な光強度を実現することに成功した。また、配光特性についても余弦配光に近似しており、分光分布の角度依存性も極めて小さく理想的な空間特性を実現している。こうした特性は分光測定における不確かさの低減に寄与するものであり、標準 LED に基づく分光全放射束標準光源の導入は、LED 照明の光学特性評価の信頼性向上に大きく貢献するものである。現在、産総研では、前述の標準 LED の小型化を進めているほか、より短波長域での分光測定に供することのできる標準 LED の開発や、従来の標準電球の代替となる 4π 配光特性を有する標準 LED の検討などを進めている。

高効率・長寿命な次世代照明として LED 光源の開発・普及が一気に進展した現在、従来光源と位置付けられる白熱電球やハロゲン電球は、一般向け製品としては減少の一途を辿っている。また、欧州を中心に、光源効率の低いこれらの光源の製造・販売を禁止する政策が実施されており、この先、マーケットの更なる減少が予想される。こうした動きから、標準値の維持・供給などの特殊用途を意図している標準電球についても、製造・販売の中止が続いている。日本においても、大手の標準電球の製造元が 2016 年に製造の終息方針を表明しており、世界的に入手が困難になってきている。こうした状況を踏まえると、分光全放射束標準光源の開発成果として紹介した、最適な特性を有する光源の市販光源からの探索およ

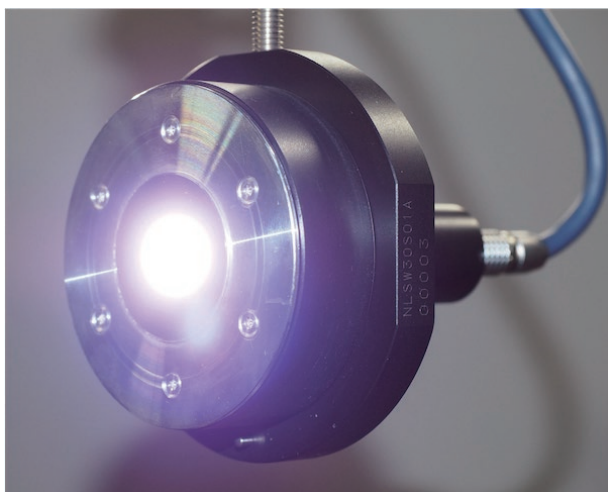


図 18 標準 LED に基づく分光全放射束標準光源 (2π 幾何条件用)

び性能向上のための付加プロセスの開発や、LED に基づく新たな標準光源の開発といったアプローチは、白熱光源に基づく標準光源の入手が困難になりつつある現在、その重要性が増しており、この先、多方面からの研究開発が展開され、知見の蓄積・共有が図られることが重要である。

6 おわりに

以上限られた紙数ではあったが、2018 年 11 月の CGPM 決議に基づく、視感効果度 K_{cd} を定数として定義する新しいカンデラの定義（従来の定義からの表現の修正）について、測光・放射標準の実現方法や関連する最近の研究に関する話題を交えて概説した。

紙数の関係上、標準器との比較測定に基づく校正方法や、国内での計量トレーサビリティ体系については本稿では殆ど触れていない。また、測光・放射標準も、ごく一部について解説しているに過ぎない。より詳細な測光・放射標準の実現およびその過程で開発された測定技術などについては、既報⁵⁹⁾を適宜ご参照頂きたい。

謝辞

本稿の執筆にあたり、校閲や写真・図の提供でご協力頂いた物理計測標準研究部門 量子光計測研究グループ 福田 大治 研究グループ長、応用放射計測研究グループ 神門 賢二 主任研究員、光放射標準研究グループ 田辺 稔 主任研究員、中澤 由莉 研究員に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) CIE S 017/E:2011, International Lighting Vocabulary (2011)
- 2) IEC 60050-845:1987, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 845 "Lighting" (1987)
- 3) JIS Z 8113:1998, 照明用語 (1998)
- 4) ISO 23539:2005/CIE S 010:2004, Photometry - The CIE system of physical photometry (2005)
- 5) CIE 6e session Genève-Juillet 1924: Recueil des Travaux et Compte Rendu de Séances, Cambridge University Press, 67/69 (1926)
- 6) Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), **40**, 145. BIPM (1972)
- 7) Compte Rendu of CIE 12th Session, Stockholm 1951, Vol. III, 32/40 (1951)
- 8) Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), **44**, 4. BIPM (1976)
- 9) ISO 80000-7:2008, Quantities and units -- Part 7: Light (2008)
- 10) 座間 達也：測光量 (cd) および測光・放射標準についての基礎解説と最近の話題，計測と制御，**53**，623/632 (2014)
- 11) P. E. Ciddor: Refractive index of air - new equations for the visible and near infrared, *Appl. Opt.*, **35**, 1566/1573

- (1996)
- 12) P. Bouguer: Essai d'optique, sur la gradation de la lumière, Jombert (1729)
 - 13) J. H. Lambert: Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, Klett (1760)
 - 14) J. W. T. Walsh: Photometry, Constable & Co. (1958)
 - 15) 山内 二郎: 測光単位の設定, 照明学会雑誌, **40**, 456/460 (1956)
 - 16) H. T. Wensel *et al.*: The Waidner-Burgess Standard of Light, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **6**, 1103/1117 (1931)
 - 17) 山内 二郎: 黒体光度標準器の実現について, 照明学会雑誌, **26**, 444/447 (1942)
 - 18) Comptes rendus de la 9e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), p.54, BIPM (1948)
 - 19) Comptes Rendus de la 11e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 87, BIPM (1960)
 - 20) Comptes rendus de la 13e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 104, BIPM (1967/68)
 - 21) H. Katsuyama *et al.*: An Experimental Determination of the Maximum Spectral Luminous Efficacy of Radiation, *Metrologia*, **11**, 165/168 (1975)
 - 22) 大場 信英: カンデラの定義改定について, 応用物理, **50**, 247/254 (1981)
 - 23) Comptes Rendus des séances de la 16e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 100, BIPM (1979)
 - 24) J. C. Zwinkels *et al.*: Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the International System of Units (SI), *Metrologia* **53**, G1 (2016)
 - 25) G. Wyszecki, *et al.*: Principles Governing Photometry. BIPM Monograph, BIPM (1983)
 - 26) CIE 191:2010, Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance (2010)
 - 27) CIE 165:2005, CIE 10 Degree Photopic Photometric Observer (2005)
 - 28) CIE 86-1990, CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic vision (1990)
 - 29) 例 えば, CIE 200:2011, CIE Supplementary System of Photometry (2011)
 - 30) 薮 洋司: 光生物学的安全性の評価に関する国際標準化の現状と課題, 照明学会誌, **100**, 201/204 (2016)
 - 31) J. E. Martin *et al.*: A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements., *Metrologia*, **21**, 147/155 (1985)
 - 32) Y. Ichino *et al.*: Improved Cryogenic Radiometry, Proc. CIE 25th Session, **1**, 18/21 (2003)
 - 33) 田辺 稔: 光パワーメータの応答直線性校正の波長広帯域化に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **8**, 349/365 (2011)
 - 34) 田辺 稔ほか: シリコンフォトダイオードの応答非直線性の波長依存性, 照明学会誌, **101**, 234/238 (2017)
 - 35) Y. Ichino *et al.*: Optical Trap Detector with Large Acceptance Angle, *J. Light & Visual Environment*, **32**, 295/301 (2008)
 - 36) E. F. Zalewski *et al.*: Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration, *Appl. Opt.*, **19**, 1214/1216 (1980)
 - 37) J. Geist *et al.*: Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiode, *Appl. Opt.*, **19**, 3795/3799 (1980)
 - 38) 齊藤 一郎: 測光・放射標準, 光学, **32**, 181/188 (2003)
 - 39) 神門 賢二: 分光測定に基づく新しい光度の具現方法に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **2**, 575/585 (2004)
 - 40) 木下 健一: 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, 産総研計量標準報告, **7**, 41/50 (2008)
 - 41) 飯田 孝之: 国際比較用光渡標準電球, 照明学会雑誌, **39**, 204/207 (1955)
 - 42) G. Sauter *et al.*: CCPR key comparisons K3a of luminous intensity and K4 of luminous flux with lamps as transfer standards, PTB-Opt-62, PTB (1999)
 - 43) ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006, Colorimetry – Part 2: CIE Standard Illuminants for Colorimetry (2006)
 - 44) M. Planck: Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, *Annalen der Physik*, **309**, 553/563 (1901)
 - 45) T. Zama *et al.*: Determining the temperature of a blackbody based on a spectral comparison with a fixed temperature blackbody, Proc. 9th International Conference on New Developments and Application in Optical Radiometry (NEWRAD2005), 281/282 (2005)
 - 46) 薮 洋司ほか: 配光測定に基づく全光束絶対校正装置の開発, 光アライアンス, **15**, 1/7 (2004)
 - 47) 中澤 由莉: 分光放射測定に基づく配光特性評価による全光束および分光全放射束標準の確立と供給に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **9**, 229/255 (2015)
 - 48) K. Godo *et al.*: Realization of total spectral radiant flux scale at NMIJ with a goniophotometer/spectroradiometer, *Metrologia*, **53**, 853/859 (2016)
 - 49) 井上 武海ほか: 高感度レーザーカロリメータによるレーザーパワー標準, 電子技術総合研究所彙報, **11**, 1259/1275 (1992)
 - 50) 福田 大治: レーザパワー・エネルギー標準とその計測技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **2**, 593/607 (2004)
 - 51) 雨宮 邦招: 光ファイバにおける標準とその計測技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **4**, 293/305 (2006)
 - 52) 沼田 孝之: 高出力レーザーパワーの標準技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **7**, 89/100 (2008)
 - 53) J. C. Zwinkels *et al.*: Photometry, radiometry and “the candela” - evolution in the classical and quantum world, *Metrologia*, **47**, R15/R32 (2010)
 - 54) C. J. Chunnillal *et al.*: Metrology of single-photon sources and detectors: a review, *Opt. Eng.*, **53**, 081910 (2014)
 - 55) D. Fukuda *et al.*: Improvements in the AIST Cryogenic Radiometer with superconducting thermometer, *IEEE trans. Instrum. Meas.*, **56**, 356/360 (2007)
 - 56) N. A. Tomlin *et al.*: Towards a fiber-coupled picowatt cryogenic radiometer, *Opt. Lett.*, **37**, 2346/2348 (2012)
 - 57) D. Fukuda *et al.*: Titanium-based transition-edge photon number resolving detector with 98% detection efficiency with index-matched small-gap fiber coupling, *Optics Express*, **19**, 870/875 (2011)
 - 58) Y. Nakazawa *et al.*: Development of LED-based standard source for total luminous flux calibration, *Light. Res. Technol.*, **51**, 870/882 (2018)
 - 59) 例 えば, 座間 達也: 光放射計測分野における達成点と今後, 計量標準と計測管理, **60**, 23/35 (2011)