

## 《第7回》

# 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

座間 達也 (計測標準研究部門)

## 1. はじめに

「明暗を分ける」、「一寸先は闇」など、諺には光に特別重要な示唆を託したものが少なくない。視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚等、所謂人の五感の内、広範囲の空間認識や運動体の認識に優れる視覚から、我々が得ている情報は特に多いと言われているが、視覚刺激の基になるのは光によって運ばれるエネルギーである事は言うまでもなく、これら諺の由来ともあながち無縁ではなからう。

古より、我々の生活に、光がどれだけ重要な役割を果たして来たかについては、上記の諺をあげるまでもなく、論をまたない。人類の祖先にとって、暗闇とそこに蠢く夜行性の肉食獣等は大きな脅威であったが、物質の燃焼時に発生する火を光源とする事で、これら脅威の多くは克服された事であろうし、夜間の視認性確保による1日の活動時間の延長や、それに伴う生産性の向上は、文明社会の構築や人口の増加に大きく貢献したことであろう。このように、火を光源とする人工照明は、長く我々人類に大きな恩恵をもたらしてきた。

しかしながら、火は手軽ではあるものの、光源としての利便性は必ずしも良好とは言えず、光源としての利用は照明用途がほとんどだった。今日の光の利用の飛躍的な広がり、1800年代後半の電気をエネルギー源とする光源の登場に負うところが大きい、これ以降、光の利用は、照明用途はもちろん、照明とは無関係の分野にも広がり、現在も利用の裾野は広がりつつある。

インジケータ・ディスプレイに代表される視覚刺激や情報伝達用途への光の利用、半導体産業等で利用される露光装置やレーザ加工に代表される加工用途への光の利用、光ファイバを利用した通信に代表される通信用途への光の利用、その他、分析分野、医療分野、環境分野、基礎科学分野等での光の利用など、照明用途に留まらない光の利用例は枚挙に暇がなく、利用対象の光の波長域も、視覚に関わる可視光のみならず、波長の短い紫外線、波長の長い赤外線や電波に近い波長をもつテラヘルツ光にまで広がりつつあるが、これらが、今日の我々にもたらした恩恵の大きさは疑うべくもない。さらなる利用可能性の追求は現在も続けられており、光は今後も多くの恩恵を我々にもたらすことだろう。

X線より波長が長く、電波より波長の短い電磁放射は、光放射と呼称されることが多いが<sup>1),2)</sup>、本稿では、光放射に関する標準として、測光・放射標準を取り上げ、その基礎と最近の話題について概説する。

## 2. 測光・放射標準の特徴

電磁放射は自由空間を伝搬するが、放射によって伝搬されるエネルギーを基準に放射を定量化したものは放射量と呼ばれ、人間の視覚に対して放射が与える影響(詳細は3章)を基準に放射を定量化したものは測光量と呼ばれる。測光・放射標準は、このような量の絶対値の基準として位置づけられるが、測光量の1つである光度の単位であるカンデラ(cd)が、国際単位系(略称SI: 仏語表記 Le Système International d'Unités)<sup>3),4)</sup>の基本7単位の内の1つを占めていることから分かる通り(その他6単位は長さ、時間、質量、温度、電流、物質質量に関する単位)、測光・放射標準は計量に欠かすことのできない重要な標準である。

特に光放射の波長域では、太陽光・火・白熱電球等に代表される熱放射光源をはじめとし、蛍光灯に代表される放電光源、LED、レーザ等、発光メカニズムや放射特性の異なる多様な光源が存在するが、レーザ以外の多くは、波長・位相・偏光・放射の広がりといった波に関わる諸特性が能動的に制御(制限)されていない(できない)放射源であり、加えて、レンズやミラー等に代表される光学素子によって放射伝搬方向の調整・制御が比較的容易なため、光放射の波長域で利用される放射の分光分布・空間伝搬特性等は千差万別である。よって測光・放射標準には、自ずと分光分布・空間伝搬特性等が多様な放射の定量化に役立つことが要請される。また、SI基本単位の光度単位カンデラが測光量であることから分かる通り、測光・放射標準には、人間の視覚に対して放射が与える影響の勘案も要請される事は言うまでもない。

測光・放射標準をよりイメージしやすくするため、以下では、上記要請の意味するところを具体例を挙げて説

明しよう。我々は、日常何気なく、“明るさ”、“眩しき”、“光の強さ”、等の言葉を、光放射によって伝搬されるエネルギーの大小に係る言葉として無意識に使っているが、実のところ以下の通り、放射形態の多様さを勘案した無意識の使い分けをしている事がほとんどである。

例えば、単位時間当たり等しいエネルギーの放射を受けていたとしても、受ける場所での放射が広がっている場合と、狭い個所に集中している場合では、その放射によって照らされる面の“明るさ”は違って認識される事であろう。同様に、単位時間当たり等しいエネルギーが放射されていたとしても、放射源及びその放射立体角が小さい場合と、大きい場合とでは放射源の“眩しき”は違って認識される事であろう（上記は主に目で見た場合を想定した例示だが、光学実験に携わる者にとってこのような評価はなじみ深かろう。前者は受光面での放射の面密度に相当し、後者はレンズ・ミラー等を用いて放射を集光した際に、集光点に実現できる放射の面密度に係るなど、光学的な評価には欠かすことが出来ない。尚、これら例示のそれぞれは次章の放射照度と放射輝度に相当する）。このように、我々が“明るさ”、“眩しき”として表現している量は、放射のエネルギーそのものではなく、それを面積や立体角（波長の場合もある。次章参照）等で規格化した量で、いずれで規格化するかの判断は、（多くは）その都度無意識に行われる。

上記判断が無意識であるがゆえ、光放射に関わる測定を我々は単純に捉えがちだが、実際に定量化するに当たっては、放射のエネルギーそのものの定量化に加え、いずれの量で規格化すべきかの放射形態に応じた判断、その量に関する定量化と規格化等が併せて求められる事は言うまでもなく、このような理由から、測光量・放射量に係る測定や、測光・放射標準の確立は単純・容易ではない。

### 3. 測光量・放射量の代表的な量と単位

最初に放射量の1つ、放射束について紹介する。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、つまり放射パワーを表し、その単位は  $W(=Js^{-1})$  である。放射束は、面積・立体角・波長等の規格化が伴わないため、放射の形態問わず適用可能で、測光量・放射量の体系上、最も単純な単位を持つ量である（表1参照。以下では放射束の量記号を  $\Phi$  で表す）。

原理的には、放射束  $\Phi$  はいかなる放射にも適用可能だが、実のところ、レーザ等単色性の高い放射の定量化以外では使いにくく、光放射に係る定量化をこれだけで行う事は現実的ではない。光放射の波長域で対象とされる放射の多くは、単色性に乏しく輝線ではない連続スペクトルを持ち、放射のパワーは波長方向に連続的に分布しているため、波長積分を経た後にパワーの次元をもつような単位を使わないと放射特性（具体的には分光分布）を十分に反映した定量化が不可能と言うのがその主な理由である。このような場合に用いられるのが分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  で、単位は  $Wnm^{-1}$  である（ここでは波長  $\lambda$  を nm 単位で表している）。

放射束  $\Phi$  と分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  は、以下の通り互いに微積分の関係になるが、理想的な単色光と連続スペクトルを具体的に対比すると両者の必要性がより分かりやすくなるだろう。

$$\Phi = \int \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = \Phi_\lambda(\lambda) \quad (1)$$

理想的な単色光は、放射パワーが特定波長に局在化しており、測定対象とする波長区間の幅をどれだけ狭めても、その特定波長を区間内に含む限りは放射束  $\Phi$  は一定となるため、放射束  $\Phi$  の波長微分である分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  は、その特定波長で無限大に発散してしまい、意味をなさない。よってこの場合は  $W$  の単位を持つ放射束  $\Phi$  を利用するのが適切である。他方、連続スペクトル光のように、放射パワーが波長方向に連続的に分布している場合は、有限の波長区間で波長積分をしない限り放射束  $\Phi$  は定義できないため（波長区間幅が0の場合は放射束  $\Phi$  も0になってしまう）、局所情報である分光分布の定量化には役不足で、 $Wnm^{-1}$  の単位を持つ分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  を利用するのがふさわしい。

次に上記に対応する測光量を紹介する。この量は光束  $\Phi_v$  と呼ばれ、単位としては lm（ルーメン）が用いられる。光束は分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  を基に、以下の式により導かれる。

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$(\Phi_v \text{ (lm)}, K_m \text{ (lmW}^{-1}), \Phi_\lambda(\lambda) \text{ (Wnm}^{-1}))$$

測光量は、人間の視覚に対して放射が与える影響を基準に放射を定量化したものであり、上式の  $K_m$  および  $V(\lambda)$ （それぞれは、最大視感効果度、分光視感効率と呼称される）が、それらの影響を表す定数及び関数である。この

ような量については、人間の感覚・心理に関わるとの解釈から、個人差による客観性や、標準の対象とする事への疑念等の誤解を生みやすいが、実際は、最大視感効果度  $K_m$ 、分光視感効率  $V(\lambda)$  とともに、多数の被験者に対する視感実験（例えば、単色光と白色光を高い周波数で切り替え被験者に観測させ、単色光の放射束の大きさを調整し、被験者が感じるちらつきが最小になる放射束を決定、可視域の各波長に対する単色光に対してこれを繰り返す等の実験）の結果を平均化する事で導かれた定数及び関数が、関係国際機関の国際照明委員会（CIE：仏語表記 Commission Internationale de l'Éclairage）、及び、国際度量衡総会（CGPM：仏語表記 Conférence Générale des Poids et Mesures メートル条約全加盟国代表により組織）で採用・勧告<sup>3)~5)</sup>されており、実質的に世界的な規格化・標準化がされているため、上記疑念には及ばない(尚、光束  $\Phi_v$  は人間の感覚・心理に関わる量であるものの、(2)式により、物理量である分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  に 1 対 1 に関係づけられるため、物理量に準じた量と言える。このような量は特別に心理物理量と呼ばれる)。

図 1 に分光視感効率  $V(\lambda)$  を示す。後の議論のため、縦軸を線形としたプロット及び対数としたプロットの 2 種類が示されているが、人間の目が感度を持つ可視波長域 360 nm～830 nm にかけて 0 以上の値を持ち、555 nm で最大値 1、それ以外の波長では 555 nm から離れるにつれ値が 0 に近づく山型の関数である。555 nm の単色放射は緑色に見えるが、これから分かる通り、人の目は緑の光に対する感度が最も高い。また、最大視感効果度は  $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$  で、分光視感効率と併せて考えると、555 nm で 1 W の放射束を持つ単色放射は 683 lm の光束に相当する事を表している（ちなみに、照明等の性能を表す指標の 1 つ、発光効率の単位は同じ  $\text{lm W}^{-1}$  で、カタログ等で目にされた方も多いかもしれない。しかしながら、単位は同じでも、発光効率は光束/消費電力で、分母が放射束である最大視感効果度と比較すると、その値は電力から放射束への変換効率分だけ小さくなる。また、分光視感効率  $V(\lambda)$  が最大になる緑色の単色放射のみで生活空間を照明する事は非現実的で、照明には白色光が必要とされるため、分光視感効率  $V(\lambda)$  が 1 以下の緑以外の光放射が含まればその分光効率は低下する。つまり、最大視感効果度  $683 \text{ lm W}^{-1}$  を超える発光効率を持つ様な照明は原理・定義上実現し得ない）。

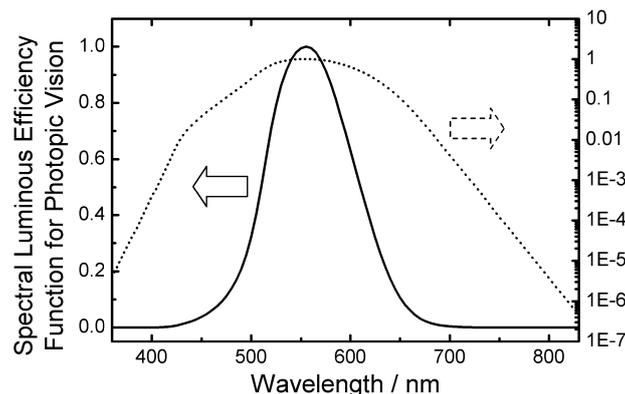


図 1. 可視域の各波長に対する分光視感効率  $V(\lambda)$ 。表示は線形プロットと対数プロットの 2 種類で、それぞれ左縦軸、右縦軸に対応する。

さて、上記では単位上もっとも単純な放射束  $\Phi$  を元に、類似次元の単位を持つ分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$  と光束  $\Phi_v$  を紹介したが、光放射の空間伝搬特性が多様であるため、上記の量を面積や立体角で規格化した量も光放射の定量化では重要である。表 1 にそれらの量と単位を示す。一見膨大に見えるが、解説済みの放射束  $\Phi$ 、分光放射束  $\Phi_\lambda(\lambda)$ 、光束  $\Phi_v$  が記載されている行を 2 行目とすると、3 行目以降は、2 行目の行の量に面積や立体角での規格化を施したものに過ぎない。尚、図 2 には、測定対象の放射と、この規格化に関わる面積・立体角との空間関係を模式的に示した。

表 1 の 3 行目は、放射を受ける面に到達する単位面積当たりの放射密度を表し、それぞれの量の名称には、“照度”がつく。4 行目は、備考にある通り、放射源が点源または点源に近似できる場合のみ定義可能な量で、点放射源から張られる円錐の単位立体角当たりの放射密度を表し、それぞれの量の名称には“強度”または“光度”がつく。5 行目は、放射源の中心から張られる円錐の単位立体角当たりに、放射源の単位面積当たりから放射される放射密度を表し、それぞれの量の名称には“輝度”がつく。

前章でも述べた通り、光放射測定で対象とする放射は、分光分布・空間伝搬特性等が多様で、実のところ、これらが一様均一とみなせる場合は少ない。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の評価をすることは現実的ではなく、表 1 に記載の通り、放射束の波長微分・空間微分の単位次元を持つ量が必要となる。

同様に、放射源や放射受光面が一樣均一とみなせる場合は少なく、表 1 記載の通り、放射源と放射受光面に対して定義される量が各々別々に必要になる。

表 1. 定量化に当たって用いられる代表的な量とその単位

対象とする放射	放射量		測光量	備考
	波長規格化なし	単位波長で規格化	波長規格化なし	
光源から、又は、 受光面での放射	放射束 $\Phi$ W	分光放射束 $\Phi_\lambda(\lambda)$ Wnm <sup>-1</sup>	光束 $\Phi_v$ lm	
受光面での放射	放射照度 $E$ Wm <sup>-2</sup> ( $\Phi A^{-1}$ )	分光放射照度 $E_\lambda(\lambda)$ Wm <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup> ( $\Phi_\lambda(\lambda)A^{-1}$ )	照度 $E_v$ Lx (=lm m <sup>-2</sup> ) ( $\Phi_v A^{-1}$ )	(a)
光源からの放射	放射強度 $I$ Wsr <sup>-1</sup> ( $\Phi \Omega^{-1}$ )	分光放射強度 $I_\lambda(\lambda)$ Wsr <sup>-1</sup> nm <sup>-1</sup> ( $\Phi_\lambda(\lambda) \Omega^{-1}$ )	光度 $I_v$ cd (=lm sr <sup>-1</sup> ) ( $\Phi_v \Omega^{-1}$ )	(b)
	放射輝度 $L$ Wsr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ( $\Phi \Omega^{-1} a^{-1}$ )	分光放射輝度 $L_\lambda(\lambda)$ Wsr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup> ( $\Phi_\lambda(\lambda) \Omega^{-1} a^{-1}$ )	輝度 $L_v$ cd m <sup>-2</sup> (=lm sr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ) ( $\Phi_v \Omega^{-1} a^{-1}$ )	(c)

- (a) 受光面上の単位面積当たりで規格化
- (b) 光源からの単位立体角あたりで規格化（光源が点光源または点光源に近似できる場合のみ定義可能）
- (c) 光源の単位面積、及び、光源からの単位立体角あたりで規格化

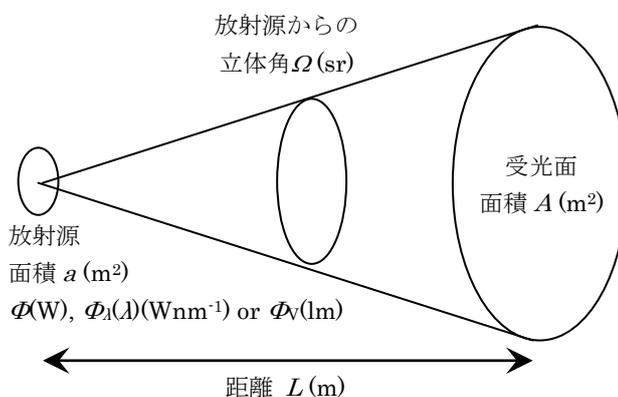


図 2. 規格化に関わる面積・立体角と放射との空間関係の模式図。

表 1、5 列目の“輝度”に関わる量について若干追加説明しておこう。レンズ・ミラー等の伝搬方向調整・制御用光学素子が容易に手に入るのは光放射の波長域ならではの特徵だが、それ故、結像光学系を利用して得た物体像を利用することも多く、人の目やカメラ等はそれに当たる。このような結像光学系により放射源の像を作った場合を考えると、源からの放射は、結像光学系を経て結像した後、(網膜・フィルム・撮像素子が無い場合は)、さらに先に進むが、この放射は物体像を中心に放射されてもいるため、物体像からの放射とみなすこともできる。詳細は成書に譲るが<sup>6)</sup>、この場合、物体像の“輝度”（適宜、放射輝度、分光放射輝度と読み替えられたい）は物体の“輝度”に結像光学系の透過率を掛けたものに等しく（よって、像の“輝度”が物体の“輝度”を上回ることはなく、透過率 100 % ならば“輝度”は物体と像で等しい）、結像光学系が多用される光放射計測では“輝度”に関わる量は欠かすことが出来ない。

同じく表 1、3・4 列目の“照度”、“光度”に関わる量についても追加で説明する。立体角の定義から図 2 の  $\Omega=A/L^2$  となるが、これから分かる通り、“照度”、“光度”に関わる量に関しては所謂逆二乗則  $E=I/L^2$  (または  $E_\lambda(\lambda)=I_\lambda(\lambda)/L^2$ 、 $E_V=I_V/L^2$ ) と呼ばれる特別な関係が成立する。

## 4. SI 基本単位・カンデラ

SI 基本単位のカンデラ(cd)は、表 1、4 行 5 列目の光度に対応する単位で、測光量に関係する単位である。詳細な説明に移る前に、まずは本単位の定義の変遷に触れておこう。

本単位の前身は、1860 年の英国に見ることが出来る。ここでは、標準ろうそくの仕様が規定され、その 1 本が実現する明るさが単位とされていた。その後、定義は、仕様を規定したガス灯や黒体により実現される明るさに置き換えられたが、放射源の運用の困難さ、受光器の性能向上などを受けて、1979 年より、SI 基本単位のカンデラ(cd)は、以下の通りの定義に改定され、今日に至っている。

“周波数  $540 \times 10^{12}$  ヘルツ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 ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度”<sup>3),4)</sup>

一見すると分かり難く映るが、周波数  $540 \times 10^{12}$  ヘルツの単色放射とは、標準状態の大気中で 555.016 nm の波長をもつ放射で、当該単色放射による放射強度の光度への置き換えは(2)式の両辺を放射の立体角  $\Omega$  で割った式を使えば良い。この時、最大視感効果度  $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$  であるから、 $1/683 \text{ Wsr}^{-1}$  の放射強度は 1 cd の光度に相当することになる。

定義の明確性と頑健性を確保するため、単色放射の規定には、伝搬媒質の屈折率の影響を受ける波長ではなく周波数が用いられ、これにより、3 章で述べた分光視感効率  $V(\lambda)$  が最大となる波長 555 nm と若干の不整合が発生するが、この不整合に起因する最大視感効果度のずれは  $0.002 \text{ lm W}^{-1}$  程度であり、現実的な測光量の測定では無視しう程度であるため、本定義は第 3 章で紹介した内容と実用上矛盾する事はない<sup>7)</sup>。

3 章で述べた通り、測光量・放射量の体系上では放射束  $\Phi$  の単位が最も単純である。しかしながら、実用上の意義、歴史的蓄積の厚さ、測光量組み立てに際しての役割の大きさ (5.4 節参照) 等から、SI 基本単位は光度単位の cd とされた。また定義に基づく標準の実現可能性の観点も含めて、現行定義内容を変更するに相応しい新定義は今のところなく、現在のところ本定義の改定は予定されていない。

## 5. 各種の測光・放射標準の実現

以下では、これまで紹介してきた測光量・放射量の定量化の基準となる標準の実現に関して述べる<sup>8),9)</sup>。

### 5.1 極低温放射計による放射束 $\Phi$ の決定

3 章で触れた通り、測光量・放射量の体系上、最も単純な単位を持つ量は放射束  $\Phi$  で、その単位は W であるため、測光・放射標準の実現には、単位 W に基づく信頼性の高い放射束  $\Phi$  の定量的評価が必要となる。現時点でこのような評価に最適な方法は、電気標準に基づく電力 (単位 W) との比較により放射束を決定する手法で、極低温環境下で熱型の光吸収体を動作させる極低温放射計<sup>10)</sup>と呼ばれる特殊な放射測定装置が用いられることが多い。図 3 に我々が使用している極低温放射計の外観と概略図を示す。

当該放射計は、内部に設けられた光吸収体に、外部から放射束と電力を交互に入力することが可能な構造で、入射放射束  $\Phi$ 、及び、入力電力  $P$  はこの光吸収体で吸収され、その際の温度上昇が温度計で測定される。温度上昇後の平衡温度が吸収熱量の指標となるため、放射束入射の際の光吸収体平衡温度を測定後、外部からの放射束入射を絶ち、代わりに外部電力を入力・調節して、光吸収体平衡温度を放射束入射の際の平衡温度に等しくなるよう調節すれば、入射放射束  $\Phi$  と入力電力  $P$  は等価となるため、当該電力を電気標準を元に決定すれば、入射放射束  $\Phi$  の校正値が得られる。

但し、入射放射束と電力の等価性が担保されるためには、a) 吸収体により入射放射束が 100 % 吸収される。もしくは、吸収率が正確に評価されている。b) 吸収体により吸収された放射束が、それと全く等価な電力に置換される。もしくは、置換係数が正確に評価されている。事が必須となる。

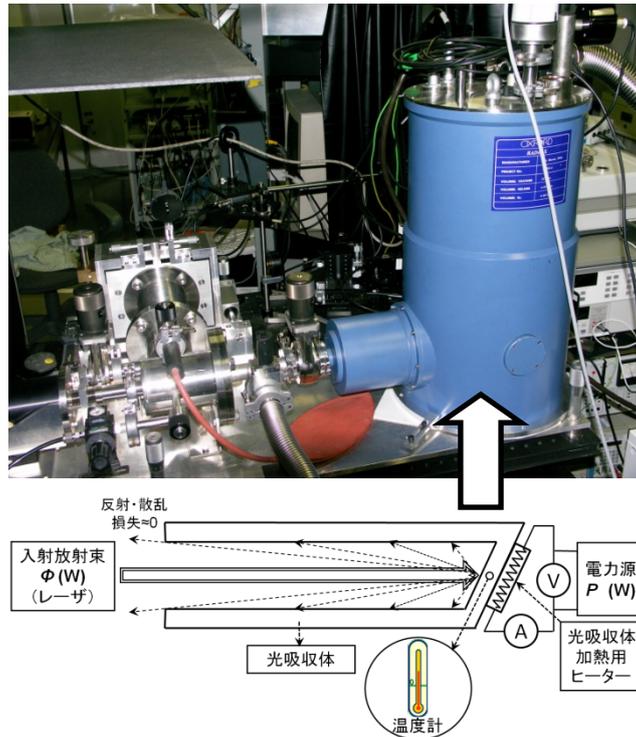


図 3. 極低温放射計の外観(上)と概略図(下)。概略図の光吸収体は矢印の位置に収納されている。放射は概略図の左側から入射する。

当該放射計の場合は、図 3 に示すような光吸収体を高アスペクト比（深さ／開口径）構造とし、内面全体を黒化処理して黒化処理表面からの僅かな反射・拡散光を殆どもなく側面の黒化面で吸収する構造とする事で吸収率を 100% に近づけ、併せて吸収率評価も行うことで a) の条件を満たしている。また、光吸収体、及び、その周辺温度を極低温の液体ヘリウムの温度近傍まで下げる事で、光吸収体からの放射損失低減、周辺から光吸収体への放射入射による擾乱抑制（物体単位面積から放出される放射束は絶対温度の 4 乗に比例する；ステファン=ボルツマンの法則）、極低温化での物質の比熱が小さくなる事を利用した入射放射束  $\Phi$  と入力電力  $P$  に対する平衡温度感度の向上、外部電力の給電線路に超伝導線を用いる事による給電線路での電力損失解消による等価性の劣化防止、等を実現する事で b) の条件も満たしている。

極低温放射計に基づき決定される放射束  $\Phi$  は、測光・放射標準の諸標準中もっとも不確かさが小さく、最小で  $10^{-2}$  % のオーダにも達する。しかしながら、上記の通り、極低温放射計の動作には特殊な条件が必要であるため、i) 極低温温度環境を確保可能な入射放射束の大きさには上限があり、ii) 熱型測定器のため波長分散（エネルギー分散）の機能が無いため分光分布が得られず、iii) 高アスペクト比の光吸収体に適した放射は直線性が良好で広がり小さいビームクオリティの高いレーザーに限られる。といった弱点があり、“単色性・直線性が良好で広がり小さい放射束”以外の測定は難しく、このままでは、光放射測定で対象とする分光分布・空間伝搬特性等が多様な放射には対応できない。よって極低温放射計で決定された放射束  $\Phi$  を元にして、i) 放射束測定の範囲拡張。ii) 分光分布を持つ放射への拡張。iii) 広がりを持つ放射への拡張・測光量への拡張。を行うことが必須である。以下 5.2 から 5.4 節では、この拡張について、順を追って概説する。

## 5.2 重畳法による放射束校正範囲拡張、分光応答度

限られた範囲での校正結果を用いて、範囲外に校正結果を拡張する場合には、重畳法と呼ばれる方法が多く用いられる。図 4 に光ファイバを用いた重畳法の概略図を示す。

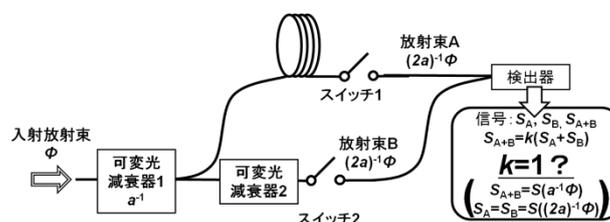


図 4. 光ファイバを用いた重畳法の概略図。

重量法では、放射束の等しい 2 つの単色または準単色放射を交互に、または、同時に入射させた際の測定信号の比較から、放射束－測定信号間の直線性を評価する事が出来るため、極低温放射計の校正可能範囲を超えた放射束に対して有意かつ再現性が良好な信号を出力するような検出器さえあれば、単色または準単色放射束の校正範囲拡張が可能である。図 4 を例にとると、具体的には 1) 上記を満たす検出器を図 4 のように設置。2) 図 4 の A, B の放射束を当該検出器で測定しながら光減衰器を調整する事で等しくし、同時に、両放射束の和は極低温放射計の校正可能範囲を超えるものの、片方の放射束は A, B いずれも極低温放射計校正可能範囲内に入るように調整。3) 放射 A, B を極低温放射計に導入して、放射束を決定し、同放射を当該検出器に入射した際の測定信号  $S_A, S_B$  から (測定信号/放射束) で表される検出器感度 (測光量・放射量の分野では、上記の様な単色 (または準単色) 放射に対する測定信号/放射束の比は、分光応答度と呼ばれる。測定信号が電流値の A で得られる場合は、単位は  $AW^{-1}$  となる。尚、“分光”と言う接頭語が意味するところがこれまでとはやや異なっている事に注意されたい。放射量そのものに対して“分光”と言う接頭語がついた場合には、表 1 の通りその単位には  $nm^{-1}$  の次元が付くが、検出器等に関わる応答度に“分光”と言う接頭語がついた場合は、あくまで単色または準単色放射の波長の関数である事を示すのみで、その単位に  $nm^{-1}$  の次元が付く事は無い) を決定。4) 放射 A, B の放射束を同時に当該検出器に入射した際の検出器信号  $S_{A+B}$  を測定し、検出器の直線性に関わる補正係数  $k$  を  $S_{A+B} = kS_{A+B}$  の式を用いて評価し、補正係数  $k$  を用いて極低温放射計の校正可能範囲を超える放射束に対する当該検出器の分光応答度を決定。の 4 つが行われるが、これらを通じて得られた分光応答度を用いれば、極低温放射計の校正可能範囲を超えた単色または準単色の放射束  $\Phi$  についても、上記検出器からの測定信号に基づき放射束の校正が可能になる。また、上記重量法を開口面積の大きな検出器に対して適用し、放射束の照射位置・照射角度を変えながら検出器の分光応答度むらを評価する事で、口径の大きな放射束に対する検出器の分光応答度も得られるため、本手法に基づけば、広がりを持つ単色または準単色放射束の校正も可能となる。

### 5.3 黒体放射を用いた分光分布を持つ放射への拡張

前節の手法を用いれば、分光応答度が校正された検出器の出力信号から、“単色または準単色の放射束  $\Phi$ ”を決定する事が出来る。しかしながら、これのみで分光分布を持つ放射、すなわち、 $nm^{-1}$  の波長微分の次元をもつ放射を定量化するのは現実的ではない。

(1)式でも示した通り、分光分布を持つ放射の定量化に必要な量は、波長微分に相当する量であるため、当該検出器のみでこれを求める場合は、(3)式に示す通り、測定対象となる放射の中から、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。このためには、濾波特性が波長に対してフラットで、濾波波長幅・中心波長がチューナブルなフィルタ・分光器等が必要だが、一般に a) フィルタ・分光器等の透過率・効率は、濾波波長の中心で最大値を持ち、その前後の波長では緩やかに減少するため、濾波特性を波長に対してフラットにする事は困難。b) 濾波波長幅を狭くする事は、検出される信号を弱める事にもつながり、S/N の悪化により不確かさも増大する。等の理由から、上記のような検出器のみによる分光分布を持つ放射の定量化は、実現が困難、もしくは不可能で、現実的ではない。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = \lim_{\Delta \lambda \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta \lambda} \int_{\lambda - \frac{\Delta \lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta \lambda}{2}} \Phi_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \Phi_{\lambda}(\lambda) \quad (3)$$

$nm^{-1}$  の次元をもつ放射を定量化するには、最初から  $nm^{-1}$  の次元をもつ標準を使用するのが現実的で、このような目的で用いられるのが黒体放射である。良く知られている通り、黒体放射の分光放射輝度  $L_{\lambda}(\lambda)$  は、放射体である黒体の温度を決定する事で一意に決まり<sup>11)</sup>、Planck の放射式と呼ばれる以下の式で表わす事が出来る。

$$L_{\lambda}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (4)$$

ここで  $h$  (Js) は Planck 定数、 $c$  ( $ms^{-1}$ ) は光速、 $k$  ( $m^2 kgs^{-2} K^{-1}$ ) はボルツマン定数、 $T$  (K) は黒体の温度である。図 5 は (4)式より導かれる分光放射輝度で、黒体温度が高いほど分光放射輝度のピークは短波長側に移動する事が分かる。図 6 は我々が利用している黒体放射炉の外観、及び、放射体概略図で、極低温放射計の光吸収体と同じく、放射体を開口が狭く奥行き広い高アスペクト比とする事で、黒体条件 (完全に黒く、黒体内部で放射された光は必ず黒体自身で吸収される) になるべく近い条件が満たされるような構成としている。

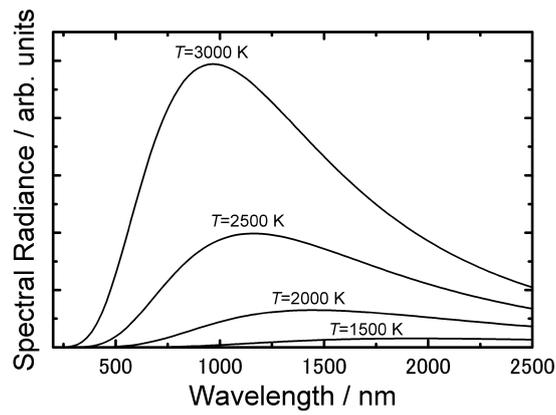


図 4. 温度が異なる黒体からの放射の分光放射輝度

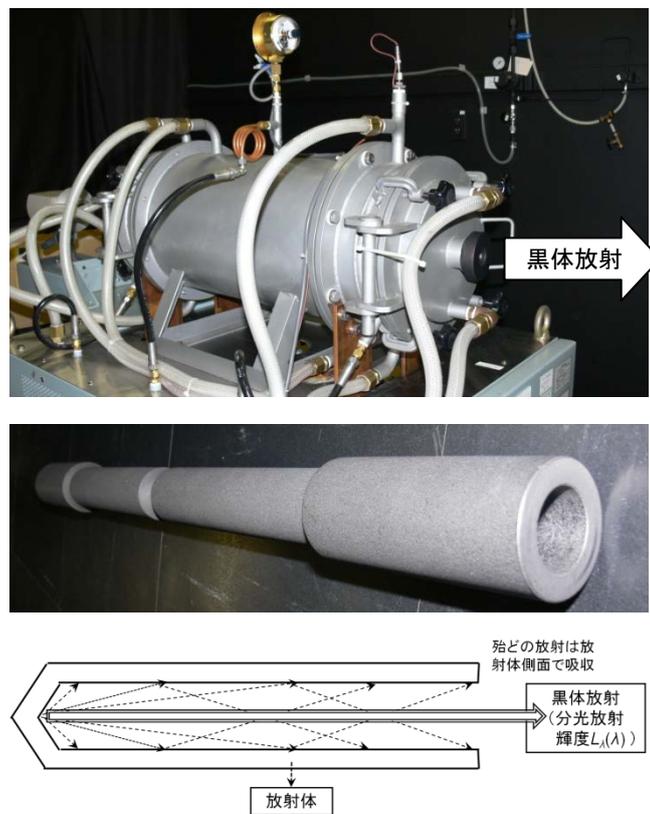


図 6. 黒体放射炉の外観(上)、炉体内部の放射体写真(中)、及び放射体の概略図(中)放射体を開口が狭く奥行きの広い高アスペクト比構造とする事で、黒体内部で放射された光の殆どは黒体自身で吸収される

(4)式が示す通り、各波長での分光放射輝度  $L_\lambda(\lambda)$  はそれぞれ黒体温度の関数であるため、バンドパスフィルタ等で黒体放射の一部の波長成分を切り出し、切り出された放射束を、分光応答度が校正された検出器により校正して、(4)式と比較すれば、一部の波長域の情報のみで黒体温度が決定でき、この黒体温度を用いれば、広い波長域での分光放射輝度  $L_\lambda(\lambda)$  が得られる。つまり、黒体放射を導入する事で、“単色または準単色の放射束  $\Phi$ ”を“ $\text{nm}^{-1}$ の次元をもつ放射量”に焼き直す事が出来る。このような理由から、測光・放射標準では、分光分布を持つ放射の上位標準として黒体放射が利用されている。

尚、分光分布を持つ放射の放射量は、上記の黒体放射との比較により決定可能だが、この比較は実はそう単純ではない。検出器等に信号を発生させ得るのは、放射が伝播するエネルギーやパワーであるため、現実には可能な

比較は、フィルタ・分光器等で所定の波長前後の狭い波長幅の放射のみを切り出した際の放射束  $\Phi$  を検出器で測定した際の測定信号の比較であり、 $\text{nm}^{-1}$  の次元をもつ波長微分量(例えば分光放射束  $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ 、分光放射強度  $I_{\lambda}(\lambda)$ 、分光放射輝度  $L_{\lambda}(\lambda)$ )そのものの比較ではないというのがその理由である。

黒体放射等、分光放射束が決定された放射  $S$  の分光放射束を  $\Phi_{S,\lambda}(\lambda)$  ( $\text{Wnm}^{-1}$ )、校正対象の放射  $T$  による分光放射束を  $\Phi_{T,\lambda}(\lambda)$  ( $\text{Wnm}^{-1}$ ) とし、各々の放射をフィルタ・分光器等を介して測定した際の信号をそれぞれ  $R_{S,\lambda}(\lambda)$  (A)、 $R_{T,\lambda}(\lambda)$  (A) とすると、これらには以下の関係式が成立する。

$$\begin{aligned} R_{S,\lambda}(\lambda) &= \int \Phi_{S,\lambda}(A) D(A) F(A, \lambda) dA \\ R_{T,\lambda}(\lambda) &= \int \Phi_{T,\lambda}(A) D(A) F(A, \lambda) dA \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $D(A)$  ( $\text{AW}^{-1}$ ) は、波長  $A$  の放射に対する検出器の分光応答度、 $F(A, \lambda)$  は、フィルタ・分光器等の濾波中心波長を  $\lambda$  とした時の波長  $A$  でのフィルタ・分光器等の波長濾波特性を示す (前出の通り、フィルタ・分光器等の透過率・効率、濾波波長の中心で最大値を持ち、その前後の波長では緩やかに減少する。 $F(A, \lambda)$  はこの透過率・効率の波長依存性を示す関数である)。

既知の放射  $S$  と未知の放射  $T$  との比較では、フィルタ・分光器等の波長濾波機器が同じである限り、これによる影響は無視できると考えて、 $R_{S,\lambda}(\lambda)$  と  $R_{T,\lambda}(\lambda)$  の比をとり、これが、分光放射束  $\Phi_{S,\lambda}(\lambda)$  と  $\Phi_{T,\lambda}(\lambda)$  の比に等しいとみなす事で、放射  $T$  の分光放射束  $\Phi_{T,\lambda}(\lambda)$  が決定される事が多いが、(5)式の通り、 $R_{S,\lambda}(\lambda)$ 、 $R_{T,\lambda}(\lambda)$  は、実のところ、分光放射束にフィルタ・分光器等の波長濾波特性と検出器の分光応答度を乗じて積分した値であり、 $R_{S,\lambda}(\lambda)$ 、 $R_{T,\lambda}(\lambda)$  の比が  $\Phi_{S,\lambda}(\lambda)$  と  $\Phi_{T,\lambda}(\lambda)$  の比に等しくなる条件はごく限られる (分光放射束  $\Phi_{S,\lambda}(\lambda)$  と  $\Phi_{T,\lambda}(\lambda)$  が比例関係にある場合等)。

紙数の都合もあり詳細は割愛するが、既知の放射  $S$  と未知の放射  $T$  の分光放射束の波長に対する二階微分が大きく異なる場合等は、 $R_{S,\lambda}(\lambda)$ 、 $R_{T,\lambda}(\lambda)$  の比と  $\Phi_{S,\lambda}(\lambda)$  と  $\Phi_{T,\lambda}(\lambda)$  の比には大きな違いが発生するため注意が必要である (12)~(14)。

#### 5.4 広がりを持つ放射への拡張・測光量への拡張

前節までで、単色または準単色の放射束を決定する手法 (5.2 節)、分光分布を持つ放射についての放射量を決定する手法 (5.3 節) について概説した。両者はそれぞれ、検出器を校正する手法と、放射源を校正する手法に対応する。

最初に、5.2 節、5.3 節の手法が、広がりを持つ放射への拡張・測光量への拡張に際して、どれだけ有効かを考えてみよう。

(2)式の定義によれば、5.3 節紹介の手法で決定した分光分布に、最大視感効果度  $K_m$ 、分光視感効率  $V(\lambda)$  を乗じて積分する事で、測光量の評価は可能である。しかしながら、5.3 節紹介の比較校正は、フィルタ・分光器等で所定の波長前後の狭い波長幅の放射のみを切り出す事を前提にしており、測定の  $S/N$  比はそれほど良好ではない。また、5.3 節紹介の手法は、開口が狭く奥行きの高い高アスペクト構造を持つ光放射体に依拠しており、多種多様な広がりを持つ放射に十分対応できるとは言い難いという欠点もある。一方、5.2 節の手法は単色または準単色の放射を前提としており、 $\text{nm}^{-1}$  の次元をもつ放射を定量化する事が出来ないため、そのままでは測光量の評価には不向きだが、開口が大きな検出器校正には対応でき、広がりを持つ放射への対応は比較的容易であるという利点がある。

以上のように、5.2 節、5.3 節の手法は広がりを持つ放射への拡張・測光量への拡張に関して一長一短があるが、両者の長所を組み合わせる事で解決を見出しているのが今日の測光標準である。以下ではそれについて概説する。

5.2 節の手法は、 $\text{nm}^{-1}$  の次元をもつ放射を定量化する事が出来ないため、そのままでは測光量の評価には不向きな事はこれまで述べた通りだが、これは、5.2 節の手法では、 $\text{nm}^{-1}$  の次元をもつ放射の波長積分値のみしか評価できない事に起因する。一方、測光量導出の基本式である(2)式は、実のところ、波長積分の形式で書かれており、 $\text{nm}^{-1}$  の次元をもつ放射まで遡らなくとも、フィルタ+検出器の組み合わせで、分光視感効率  $V(\lambda)$  に比例する分光応答度を実現できれば、このような検出器からの出力は測光量に比例し、比例乗数は分光応答度と放射源-検出器間の幾何学的パラメータから決定可能で、フィルタ・分光器等のように狭い波長幅で放射を切り出す事もしないため、検出器出力の  $S/N$  の問題も顕在化しない。このような長所を鑑み、広がりを持つ放射への拡張・測光量への拡張は“基本的に”5.2 節の手法に分光透過率を最適化したフィルタを組み合わせる事で実現される。

このように書くと、5.3 節の手法は不要で組み合わせなど意味がないように思われるかもしれないが、上記で“基本的に”と書いた通り、現実はその単純ではない。

図 1 で示した分光視感効率  $V(\lambda)$  の対数プロットは、430 nm から 520 nm 近辺に傾きが不自然に変化する部分が

あり、これをフィルタ+検出器の組み合わせで実現する事は現実的に困難で、フィルタ+検出器の組み合わせで実現可能な相対分光応答度  $D(\lambda)$  は  $V(\lambda)$  に近似させる事は出来ても完全には一致しない。よって、フィルタ+検出器の組み合わせで得られる値は、本来の測光量とは完全に一致し得ない。

また、透過型・反射型の光学物質の透過・反射率が入射角依存性を持つ事は、光学の教科書でも紹介される一般的な物理現象だが<sup>6)</sup>、検出器でも同じ事が起こり、その分光応答度は放射の入射角度に依存して変化するため、直入射から外れた放射の測光量を検出器で測定した際の結果は、やはり、本来の測光量とは完全に一致し得ない。

検出器に起因するこれらの不一致を解消するためには、a) 検出器に対する放射の入射角度や分光分布がある一定の条件となるよう、十分な制御がされた放射源を用意し、b) これと検出器の組み合わせで測光量の標準を実現し、c) a) の一定条件から外れた放射源に対しては、一定条件からの外れを評価し、検出器からの測定結果にこの外れから評価された補正係数を乗ずる事で測光量を評価する、方法が最も現実的で不確かさも抑えられるため、測光量の標準の実現にはこの方法が採用されている。

図7は、このような目的で利用される光度標準電球である。

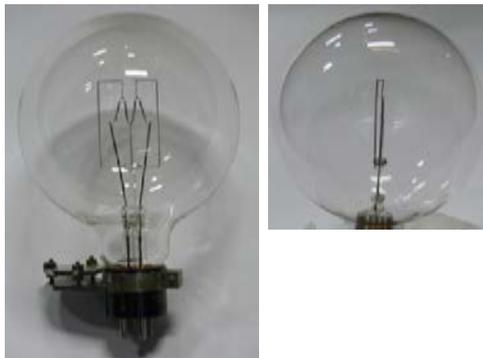


図7. 光度標準電球正面図(左)、光度標準電球側面図(右)正面図でM字型に見えるのがフィラメントで、発光部のサイズを出来る限り抑え、かつ、ある基準面上に位置するよう、製造に当たっては細心の注意が払われている。

3章記載の点光源の条件は、検出器に対する放射の入射角度条件を単純化し a) の幾何学条件を満たす事はもちろん、光度-照度間の逆二乗則を保証し、各種測光量の組み立て上の利便際も高くなるなどの利点がある。このような事情から光度標準電球は、比較的に近い距離でも点光源近似が可能になるよう特別な工夫がされており、発光部のサイズを出来る限り抑え、かつ、発光部がある基準面上に位置するよう、フィラメントに及びバルブ製造に当たっては細心の注意が払われている。また、可視域で黒体放射に近似可能な分光分布を持つ放射を出す事が知られており、a) の分光分布に関わる条件も満たされている。

上記の標準電球と、フィルタ+検出器の組み合わせで分光応答度を分光視感効率  $V(\lambda)$  に近似させた受光器との組み合わせで光度の標準は実現されるが(上記 b) に相当)、光度標準電球 S と分光分布が異なる放射源 T に関しては、上記の分光視感効率  $V(\lambda)$  に近似させた受光器による測定で得られた結果に、色補正係数と呼ばれる以下の量  $k$  を乗ずる事で評価が可能である(上記 c) に相当)。ここで  $P_S(\lambda)$ 、 $P_T(\lambda)$  はそれぞれ光度標準電球、被校正放射源の相対分光分布。 $D(\lambda)$ 、 $V(\lambda)$  はそれぞれ検出器の相対分光応答度、分光視感効率を表す<sup>15)</sup>。

$$k = \frac{\int P_S(\lambda) D(\lambda) d\lambda \int P_T(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int P_S(\lambda) V(\lambda) d\lambda \int P_T(\lambda) D(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

上記は、不確かさを小さく抑える事が出来る検出器に基づく手法(5.2節)に、分光分布と幾何学条件が制御された放射源の情報(5.3節)を巧みに組み合わせる事で初めて実現できる校正体系で、現実的な方法で不確かさを小さく抑えられるため、広く用いられている。また、光束については、本手法で校正された光度または照度を、立体角または面積積分する事で評価される。

## 6. 測光・放射標準に関する最近の話題

以下では、測光・放射標準に関する最近の話題について概説する。

光は波としての側面と粒子としての側面を併せ持ち、光の周波数を  $\nu$  とすれば、光子 1 個の持つエネルギーは、Planck 定数  $h$  (Js) を用いて  $h\nu$  (J) で表される。よって、単位時間あたりに到達する光子数をカウントし、 $h\nu$  を乗じれば放射束  $\Phi$  (W) を求める事が可能となる。光子計測技術は近年著しい発展を見せており、このような背景を受け、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。

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) の評価の課題や、測定器や電子回路の応答速度に関する課題 (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  $540 \times 10^{12}$  ヘルツ (4 章参照) の単色放射に対する光子 1 個のエネルギーは  $3.58 \times 10^{-19}$  (J) で、測定対象とされる事の多い放射束レベルの下限、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) など、克服すべき問題が残されており、光子数検出による放射束評価は 5.1 節で述べた極低温放射計による放射束評価の不確かさに及ばないが、今後が期待される技術である。

図 8 に当所で行われた光子数計測の一例を示す。

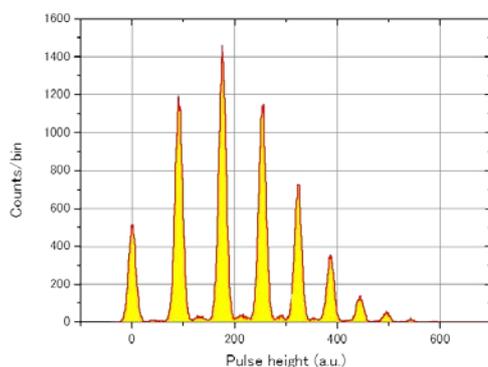


図 8. 光子のエネルギー弁別が可能な超伝導転移端検出器による光子数測定結果。光子到達イベントに Poisson 分布が顕在的に表れている。

上記は、光子のエネルギー弁別が可能な超伝導転移端検出器<sup>16)</sup>を用いて、放射束を十分小さくした波長 1550 nm のパルスレーザー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。光子のエネルギーが揃っているはずの単色光を入射したにもかかわらず、光子エネルギーのピークが 9 か所程度に見えるが、これは、単位時間当たりの到達光子数を少なくすると、光子到達イベントに Poisson 分布が顕在的に表れ、複数個の光子が重なって検出される事によって、1 到達イベントのエネルギーが 1 個の光子エネルギーの整数倍になった事に起因している。放射束標準の実現には、このような光子数分布に対する検討も必要になる。

上記は放射標準の上流に関わる話題だが、LED 照明の登場・普及により、測光標準の分野でも新たな研究開発が進みつつある。照明用電力は、家庭内の消費電力の 2 割近くを占めると言われており、長寿命や低消費電力などの長所がある LED 照明は、省エネルギーの観点、新たな産業振興への期待等から注目されているが、LED 照明は、従来照明と比較してその分光分布・空間伝搬特性等が多様で、従来でも多様性に富んでいた分光分布・空間伝搬特性がさらに多様化しつつある。このような状況に対応するには従来の標準では役不足で、多様性が顕著過ぎて 5.4 節(6)式で述べたような色補正係数  $k$  に基づく標準体系では対応しきれない状況が顕在化し始めたため、(2)式に基づき、分光分布と最大視感効果度  $K_m$ 、分光視感効率  $V(\lambda)$  から、測光量を求める事を可能とするような新たな標準、分光全放射束標準が新たに開発された。図 9 に我々が使用している分光全放射束標準電球を示す。



図 9. 分光全放射束標準電球。LED 照明等多様性に富んだ放射源の校正に役立つよう、分光分布、放射束、再現性等を勘案した慎重な選別や点灯条件最適化が実施された

放射源から全空間に放射される光束は全光束と呼ばれ、全光束／消費電力で表される発光効率は照明評価に重要だが、全光束を簡便に測定するために使用される球計光束系と呼ばれる装置は、5.4 節で示した相対分光応答度  $D(\lambda)$  の評価が困難で、従来の放射源程度の多様性であれば色補正係数  $k$  の評価で対応できるものの、LED 照明では色補正係数  $k$  の評価に関わる負担が大きすぎ、球計光束系の相対分光応答度  $D(\lambda)$  評価を不要とするような標準確立が望まれていた。分光全放射束標準は全空間に放射される分光放射束が校正された光源で、球計光束系の分光応答度  $D(\lambda)$  が測定中一定に保持される限り（この条件は大部分の球計光束系で問題なく満足される）、球計光束系の分光応答度  $D(\lambda)$  に関する定量化は不要で、球計光束系から出力される分光信号の比較測定のみにより被校正光源の分光全放射束が校正され、これを(2)式に適用する事で被校正光源の全光束が校正できる。よって、球計光束系の相対分光応答度  $D(\lambda)$  評価を不要とする事が可能となる。

## 7. 終わりに

以上限られた紙数ではあったが、測光・放射標準についての基礎と最近の話題について概説した。本文中でも述べた通り、測光・放射標準が定量化対象とする（定量化対象とすることを要請される）放射はその分光分布・空間伝搬特性等が多種多様で、放射束  $\Phi$  のみならず、その波長微分・空間微分が組み合わせられた量に対する定量化も要請されるのに対して、この多様性全てに応えうる柔軟かつ万能な測定装置・手法は現在のところ存在しないため、現在の測光・放射標準は、限られた範囲での信頼性のみが保証可能な多様な装置・手法を巧みに組み合わせ最適化する事によって確立されている。一方、これらの装置・手法が多様であるがゆえに、その不確かさや成熟度も多様で、成熟度の高い装置・手法には確立以降長い年月変わる事無く維持されてきたものもあるなど、技術的な幅は大きく、これらを勘案すると、測光・放射標準の定義改定はその必要性を含め熟慮が必要な一筋縄では扱えない問題と言えよう。

筆者の浅学非才ゆえ、多様かつ複雑な内容を含む測光・放射標準を分かりやすく解説できたとは言い難いが、本解説が読者諸兄の測光・放射標準分野への理解・興味の一助となり、当該分野の裾野の広がりのおかげとなるようであれば幸いである。

尚、末筆ながら、本解説執筆に当たり、写真・図等の提供でご協力いただいた当所光放射計測科諸兄に感謝する。

(2014年6月10日受付)

## 参 考 文 献

- 1) Commission Internationale de l'Éclairage (CIE): CIE 17.4-1987, International Lighting Vocabulary, 379 (1987)  
(Joint IEC/CIE publication, IEC 60050-845:1987, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 845: Lighting)
- 2) (一社) 日本照明委員会 : 国際照明用語集, 115 (1989)  
(International Lighting Vocabulary の日本語訳)
- 3) Bureau International des Poids et Mesures (BIPM): The International System of Units (SI) 8th edition, 180 (2006)  
[http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure\\_8\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf)
- 4) (独)産業技術総合研究所 計量標準総合センター : 国際単位系(SI), 95 (2006)  
<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>  
(International System of Units (SI) 8th edition の日本語訳)
- 5) Commission Internationale de l'Éclairage (CIE): CIE 086-1990, CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision, 13 (1990)
- 6) M. Born, E. Wolf 著, 草川徹訳 : 光学の原理 第5版 I, 419, 東海大学出版部(1991)
- 7) Bureau International des Poids et Mesures (BIPM): The International System of Units (SI) 8th edition, Appendix 2, The photometric base unit – the candela (2007) (published in electronic form only, on the BIPM website)  
[http://www.bipm.org/utis/en/pdf/SIApp2\\_cd\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utis/en/pdf/SIApp2_cd_en.pdf)
- 8) (独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門 光放射計測科 光放射標準研究室 HP  
<https://www.nmij.jp/~photo-rad/opt-rad/>
- 9) 同科 レーザ標準研究室 HP  
<https://www.nmij.jp/~photo-rad/laser-std/>
- 10) J E Martin, N P Fox and P J Key, : A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements., Metrologia, Vol. 21, 147-155 (1985).
- 11) M. Planck, : On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum., Annalen der Physik, vol. 4, 553ff (1901)
- 12) J. L. Gardner, ; Bandwidth correction for LED chromaticity., Color Res. Appl. 31, 374-380 (2006)
- 13) E. I. Stearns and R. E. Stearns, : An example of a method for correcting radiance data for bandpass error., Color Res Appl., 13, 257-259 (1988)
- 14) T. Zama and I. Saito, : Uncertainty of Radiant Power Calibration based on Synchrotron Radiation caused by Spectral Distribution and Polarization State., AIP Conf. Proc. 1234, 793-796 (2010)
- 15) (株) 日本理工出版会 : 光の計測マニュアル, 453, (社) 照明学会編 (2003)
- 16) Daiji Fukuda, Go Fujii, Takayuki Numata, Kuniaki Amemiya, Akio Yoshizawa, Hidemi Tsuchida, Hidetoshi Fujino, Hiroyuki Ishii, Taro Itatani, Shuichiro Inoue, and Tatsuya Zama, : Titanium-based transition-edge photon number resolving detector with 98% detection efficiency with index-matched small-gap fiber coupling, OPTICS EXPRESS, 19-2, 870-875 (2011)