

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

中澤由莉*

(平成 26 年 1 月 27 日受理)

A survey on realization and supply of total luminous flux and total spectral radiant flux by a goniospectroradiometric measurement

Yuri NAKAZAWA

Abstract

In order to evaluate total luminous flux of light sources or luminaires, total luminous flux or total spectral radiant flux standard is necessary. The rapid spread of solid state lighting (SSL) in recent years requires measuring SSL accurately. Total spectral radiant flux standard, which is indispensable for SSL measurements, can be realized using goniospectroradiometric method. However, there are still some technical issues associated with spatial and spectral measurement, traceability and transfer standards, which must be solved in realizing and disseminating the standard. This paper gives an overview of the methods for measuring total luminous flux, luminous intensity distribution and chromaticity of SSL based on a goniospectroradiometric measurement. This paper also describes some different approaches to realizing and disseminating the total spectral radiant flux.

1. 緒言

光の強さを定量化する方法には、物理量に基づいて定量化する方法と、光が人間の視覚に与える刺激の大きさを加味して定量化する方法の二種類がある。前者は放射量と呼ばれ、光が運ぶエネルギーに、その時間、空間、波長特性を加味して定量化が行われる。一方、後者は測光量と呼ばれ、光が運ぶエネルギーによって生じる視覚刺激の大きさを放射量に対して重み付けることで評価される。測光量は人間が感じる明るさに関係しており、その評価には、人間の視覚刺激の平均的な大きさとして勧告されている値が用いられる。

国際単位系 (SI) は 7 つの基本単位から構成されるが、その内の一つカンデラ [cd] は測光量の一つである光度の単位であり、SI 基本単位の中で唯一、人間の感覚に

関連した物理量 (心理物理量) の単位である。光は人間の生活に深く結びついた量であり、人間の感覚 (視覚) に関連した測光量の測定は、社会や産業、日常生活に不可欠なものである。

電球や照明器具、ディスプレイをはじめとした光源の特性評価に最もよく用いられる測光量は、全光束である。全光束は光源の明るさを示す指標の一つで、光源から全空間に放射される光束の総和で表わされる。測光量の単位体系上、光束に時間的、空間的特性を組み合わせることで他の測光量の単位が作られることから、光束は測光量の基本となる量であり、光束あるいは全光束の評価は測光体系において重要な位置を占める。さらに、全光束は、光源や照明器具の光源効率 [lm/W] (消費電力 [W] に対する全光束 [lm] の比) の評価に欠かせない量でもある。電力を光に変換する際の効率を表す光源効率は、照明の省エネ指標として不可欠であるため、光源および照明器具の全光束の測定には十分な信頼性が求め

*計測標準研究部門光放射計測科光放射標準研究室

られる。このほか、光源から放射される光の強度分布（配光）や、光源から全空間に放射される光の色に関わる量の評価も、光源の特性評価や照明設計において欠かせない要素である。

以上のような光源の特性評価に欠かせない量を正確に測定することは、光源や照明器具の信頼性や安全性を確保する上で不可欠であるが、LEDをはじめとした固体素子照明（SSL）では特に重要である。その背景として、近年のLEDの著しい研究開発の進展に伴い、光源効率が従来光源と同等以上に改善されてきていることや、世界的な省エネ志向の高まりからSSLの普及が急速に進んでいることが挙げられる。このような状況を受け、日本では、2012年に電球形LEDランプ（A形）がエコマーク制度の対象となったほか¹⁾、2013年には省エネ法による電球型LEDランプのトップランナー基準の策定が行われ²⁾、2014年には運用が始まる予定となっている。海外においては、米国の環境保護庁が、Energy StarプログラムによるLED照明の認証・ラベリング制度を実施しており³⁾、米国以外の国の製造事業者・試験所で当該制度を利用している事例も多い。光源効率は、これらの制度で求められる仕様に対する適合・不適合を判断するための性能指標の一つであるため、SSLの正確な全光束評価に対する要望は大きい。しかしながら、SSLは、1) 新たに登場した光源であるため、測光ノウハウが十分でない、2) 従来光源と比べて製造の際の分業化が進み、自らLEDを製造しなくともLEDを外部調達してSSLを組み立てる事が可能であることから、これまで照明に関わっていなかった多くの新規事業者が参入しているために、SSLの光学諸特性は従来光源と比べて著しく多様化している、3) 従来の光源とは光学諸特性が異なる、等の理由で、従来光源と比較すると、SSLの正確な光放射特性評価はいまだに難しい課題である。

SSLの正確な光放射特性評価、さらにはSSL製品の信頼性確保のためには、SSLの測光に適した標準の開発や製造事業者・試験所等の測光技術の向上、SSLの性能評価の指針や基準作りが不可欠である。現在、これらの活動が世界中で行われており、各国で新規標準の開発が行われている。日本における測光量および放射量に関わる標準の開発・維持・供給を行っているのは、産業技術総合研究所計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan: NMIJ）であり、日本の国家計量標準機関（National Metrology Institute: NMI）としての役割を担っている。国家標準にトレーサブルな測光量の体系は、NMIJが所有する国家標準を頂点として形成されている。近年では、SSLの測光ニーズに応じて、高強度

LED用標準などの新たな標準の開発や、SSLの多様な分光分布に対応するための新たな測光技術の開発が進められている。

従来の測光においては、分光応答度を人の目の分光感度（分光視感効率：2.1節参照）に合わせた $V(\lambda)$ 受光器を用いる測定が主流であった。これは、分光放射測定によって放射量を測定した後に計算によって測光量を算出するよりも、 $V(\lambda)$ 受光器を用いて直接測光量を測定する方が、測定時間が短く容易であり、従来光源に関しては比較的の不確かさの小さな測定ができたためである。しかしながら、 $V(\lambda)$ 受光器の分光感度を人の目の分光感度に完全に一致させる事は不可能である等の技術的な理由により、SSLに対して $V(\lambda)$ 受光器を用いて不確かさの小さな評価を行う事は容易ではない。近年の分光放射計の精度の向上や測定技術の向上に伴って、分光放射測定による測光量の評価を短時間で比較的の小さな不確かさで行うことが可能になってきたこともあり、分光放射測定に基づく測光量の評価は、標準開発や光源の特性評価に不可欠な技術となっている。

本調査研究では、信頼性の高い全光束測定に対するニーズと測定に必要な標準について調査し、SSLの全光束評価に適した標準として注目されている分光全放射束標準と、その確立に必要な分光放射測定に基づく配光特性評価技術について調査すること、および、分光全放射束標準の確立と供給のための現状と今後の課題について検討を行うことを目的としている。本稿はその結果をまとめたものであり、6章から構成される。第2章では、従来の全光束評価技術と全光束標準について述べる。第3章では、SSLの全光束評価の課題と分光全放射束標準の概要について述べる。第4章では、分光全放射束標準の具現方法と、分光放射測定に基づく配光特性評価技術について詳述する。第5章では、それまでの調査結果を踏まえ、分光全放射束標準の確立と供給に向けた今後の課題とその解決策について検討を行う。第6章では本調査研究を総括する。

2. 全光束標準の具現と供給

2.1 光度・光束単位の定義と全光束

国際単位系（SI）において、測光の基本単位に位置づけられているのはSI基本単位の一つである光度単位（cd：カンデラ）である。現在のカンデラの定義は、1979年の第16回国際度量衡総会（CGPM）において「カンデラは、周波数 540×10^{12} 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 $1/683$ 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である」と定められた。この定義は、周波数 540×10^{12} Hz (波長: 約 555 nm) の単色放射について放射量と測光量の関係を定めたものである。他の波長の光放射についての放射量 X_e と測光量 X_v の関係は次の式の通りであり、 $V(\lambda)$ および K_m は、それぞれ分光視感効率、最大視感効果度と呼ばれる。

$$X_v = K_m \int_{360}^{830} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $X_e(\lambda)$ は放射量 X_e の分光密度を表す。分光視感効率 $V(\lambda)$ は、光放射に対する人間の目の感度を波長に対して標準化・規格化したものであり、国際照明委員会 (CIE) により可視域の 360 nm から 830 nm において 1 nm 間隔で値が定められている (図 1)。測光量の測定においては、この $V(\lambda)$ に近似した分光応答度を有する受光器 ($V(\lambda)$ 受光器) が用いられる。最大視感効果度 K_m は、 $V(\lambda) = 1$ となる波長 $\lambda = 555$ nm において放射量と測光量を結び付ける量であり、実用的に十分な精度で $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ と規定されている⁴⁾。

表 1 に、主な放射量、およびそれに対応する測光量を示す。測光量の一つである光束は、放射量である放射束 (単位: W) に対応する測光量で、式 (1) の $X_e(\lambda)$ を放射束の分光密度、すなわち分光放射束 $\phi_e(\lambda)$ で置き替える事によって評価され、単位はルーメン (記号: lm) である。歴史的経緯から、測光放射量に関する SI 基本単位は光度となっているが、光度は光源からある方向に放射された単位立体角あたりの光束を表わしており、単位の組み立て上は最も基本的な測光量は光束である。1 lm は上記の定義から「すべての方向に 1 cd の光度をもつ点光源が、立体角 1 sr 内に放出する光束」と表わされる。放射輝度および輝度は、光源を面とみなした場

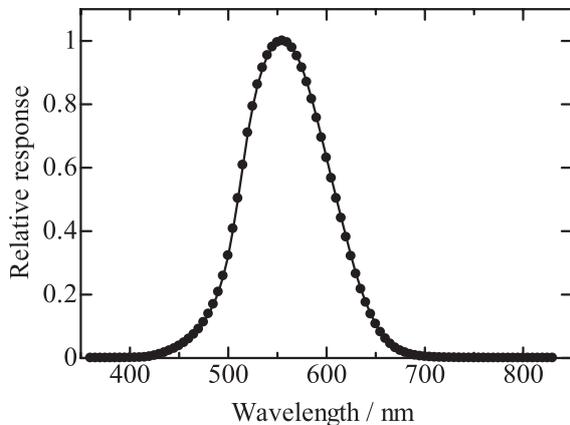


図 1 分光視感効率 $V(\lambda)$

合に、光源の単位面積当たりから放射される放射強度および光度を表したものである。放射照度および照度は、受光面の単位面積当たりに入射する放射束および光束を表したものである。これらの関係を図 2 に示す。なお、放射発散度は放射照度と同じ単位を有するが、光源の単位面積当たりから放射される放射束を表す量である。

現在、光束に関する標準は、全空間に放射される光束の総和、すなわち全光束標準として具現され、供給が行われている。ここで、全空間とは、光源を中心として立体角 4π sr で表わされる空間のことである。全光束標準の具現、および測定方法には、定義に準じた測定方法である配光測定法や、全光束値が既知の標準光源を利用した比較測定に適した球形光束計法が用いられる。これらの方法について、次章で詳述する。

2.2 配光測定法による全光束標準の具現⁵⁾⁻⁶⁾

2.2.1 原理

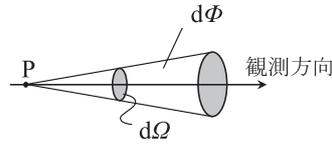
配光とは、光源の光度の空間分布のことであり、光源の各方向における光度の分布または照度の分布を測定することを配光測定という。配光測定は全光束の定義に沿った測定法であり、現在まで全光束標準の具現方法として多くの NMI で用いられている手法である⁷⁾⁻¹¹⁾。

図 3 に、配光測定法による全光束測定の概念図を示す。一般に、配光は光源を基準にして定められた極座標系を用いて表される。極軸は光源の中心を通る鉛直軸であり、極軸からの角度は鉛直角 θ で表される。この極軸は、電球の場合、図 3 のように光源の中心を通り光源の口金とバルブの頂点を結ぶ軸であり、照明器具の場合は、一般に、光源の中心を通り発光面に対して垂直な軸となる。極軸 (鉛直軸) を含む面は鉛直面と呼ばれ、光源の中心を通り鉛直面に対して垂直な軸を水平軸と呼ぶ。水平角 ϕ は極軸を回転中心とした回転の角度であり、ある基準となる鉛直面と他の鉛直面との角度を表す。全光束の定義から、全光束は光源の各方向における光度の積分値として表すことができる (式 (2))。

表 1 放射量と対応する測光量

放射量		測光量	
量	単位	量	単位
放射強度	W sr^{-1}	光度	cd
放射束	W	光束	lm
放射輝度	$\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$	輝度	cd m^{-2}
放射照度	W m^{-2}	照度	lx
放射発散度	W m^{-2}	光束発散度	lm m^{-2}

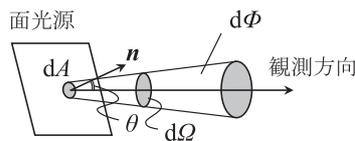
●放射強度または光度 I



$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

I : 放射強度または光度
 P : 点光源
 $d\Omega$: 微小立体角
 $d\Phi$: 微小立体角 $d\Omega$ あたりの放射束または光束

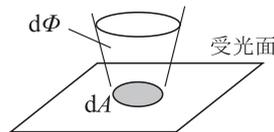
●放射輝度または輝度 L



$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta} = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta}$$

L : 放射輝度または輝度
 dA : 面光源の微小面積
 n : 面光源の法線
 θ : 観測方向と面光源の法線とのなす角

●放射照度または照度 E



$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

E : 放射照度または照度
 dA : 受光面の微小面積
 $d\Phi$: 受光面に入射する放射束または光束

図2 主な放射量、測光量の関係

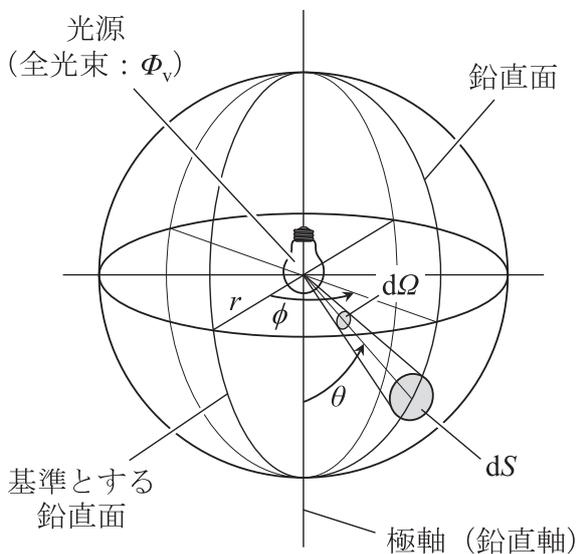


図3 配光測定法による全光束測定概念図

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v \cdot d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_v(\theta, \phi) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2)$$

ここで、 Φ_v は光源の全光束 [lm]、 $I_v(\theta, \phi)$ は光源の各方向における光度 [cd]、 θ と ϕ はそれぞれ光源に対する鉛直角と水平角、 $d\Omega$ は微小立体角 [sr] である。一方で、

点光源の光度 I_v と光源からの距離 r [m] における照度 E_v についての逆二乗則

$$I_v = E_v r^2 \quad (3)$$

から、式 (2) は、光源を中心とした半径 r [m] の球面上の照度の積分値として次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Phi_v &= \int_S E_v \cdot dS \\ &= r^2 \int_{\Omega} E_v \cdot d\Omega \\ &= r^2 \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E_v(\theta, \phi) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $E_v(\theta, \phi)$ は光源を中心とした球面上の照度 [lx]、 dS は半径 r [m] の球面上の微小面積 [m²] である。

実際の測定では、後述の配光測定装置を用いて、光源または受光器を回転させることにより、光源を中心とした球面上の各点の方向における光度または照度を測定する。そして、得られた配光分布から全光束を算出する。ただし、式 (2)、(4) が全空間での積分を表しているのに対して、光源を中心とした球面上のすべての点において光度あるいは照度を (切れ目なく) 測定することは不可能である。そのため、全光束の算出においては、式 (2)、(4) は区分求積に書き直される。

全光束測定における区分求積では、球帯係数法と呼ば

れる手法が一般的である。球帯係数法とは、鉛直角の測定角度間隔を $\Delta\theta$ として配光測定を行い、鉛直角方向 θ における光度値に鉛直角 θ による重み付けを行って和をとる方法である。大抵の場合、 $\Delta\theta$ は一定間隔である。まず、配光測定によって得られた各方向における光度の分布 $I_v(\theta, \phi)$ の水平角 ϕ に対する平均をとる。これは、水平角 ϕ に対して光度の変化が無い(軸対称配光)という仮定に基づいている。実際、電球などの光源においては、鉛直角 θ に比べて水平角 ϕ に対する光度の変化は小さいと言える。さらに、測定角度 θ を中心にして $\theta \pm \Delta\theta/2$ の範囲(幅 $\pm \Delta\theta/2$ の球帯)では光度が一定であるという仮定を行うと、式(2)の全光束 Φ_v は区分求積で式(5)のように近似される。

$$\Phi_v \approx 2\pi \sum_{i=1}^n \overline{I_v(\theta_i)} \cdot \sin \theta_i \cdot \Delta\theta \approx \sum_{i=1}^n \overline{I_v(\theta_i)} \cdot Z(\theta_i) \quad (5)$$

ここで、 $\overline{I_v(\theta)}$ は、鉛直角 θ_i を固定し水平角 ϕ を変化させて測定したときの光度 $I_v(\theta, \phi)$ の平均値であり、 $\Delta\theta$ は鉛直角度間隔、 n は鉛直方向の測定点の数である。 θ_i は n 個の測定点の鉛直角度であり、 $\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta$ である。 $Z(\theta_i)$ は球帯係数と呼ばれている係数であり、鉛直角度による重み付けである。球帯係数 $Z(\theta_i)$ は次の式を用いて計算される¹²⁾。

$$Z(\theta_i) = \begin{cases} 2\pi \left[\cos \theta_i - \cos \left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right] & (\theta_i = 0) \\ 2\pi \left[\cos \left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2} \right) - \cos \left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right] & (0 < \theta_i < \pi) \\ 2\pi \left[\cos \left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2} \right) - \cos \theta_i \right] & (\theta_i = \pi) \end{cases} \quad (6)$$

配光測定法による全光束の算出法には、他にもルーソー図法や平均法が存在する¹³⁾。ルーソー図法は、縦軸に $1 - \cos\theta$ 、横軸に光度 $I_v(\theta)$ をとって値をプロットし、得られた曲線と軸で囲まれた面積から全光束を求める手法である。平均法は、測定点の光度の相加平均を全球面にわたる光度の平均として算出し、その値に全立体角 $4\pi \text{ sr}$ を掛け合わせることで全光束値とする手法である。平均法には、鉛直角 θ の取り方の違いからラッセル角法と山内角法がある。これらの手法は、古くは百年も以前の、手動での配光測定が行われていた頃に提案されたものであり、測定点の数も少なく想定されていた¹⁴⁾。1958年に計測が自動化された配光測定装置が開発され¹⁵⁾、その後の計測技術の発展により精密な自動測定とコンピュータによる全光束の積算が可能になった現在では、ほとんどの場合で、等間隔で多数の測定点での測定を行い球帯係数法によって全光束を算出する方法が用い

られている。

2.2.2 配光測定装置

配光測定はもっとも原理に忠実な全光束測定法であるが、光源の配光を離散的な測定点で測定し、測定点の間では光源の光度は一定と仮定して積算するという性質上、正確な測定のためには測定点が多く必要である。そのため、一つの光源に対する測定時間が長い測定法でもあり、現在では配光測定装置はほとんどが自動化されている。

配光測定装置は、一般に、回転機構部、光源取付部、受光器、電源、制御装置、電気計器および電気回路から構成される。一般的な配光測定装置に対する要求事項をまとめると次のようになる^{6), 12), 16)}。

- ・国家標準にトレーサブルな標準を用いて校正される
- ・全空間にわたって光源の光度分布または照度分布の測定が可能である
- ・測光軸(鉛直軸と水平軸)が直交している
- ・光源の点灯姿勢の再現性が良く、光源の位置決めを正確に行うことができる
- ・回転機構部について、角度の再現性が良く、回転むらや振動、偏心、軸ずれを起こさない構造になっている
- ・十分な測光距離がある
- ・迷光が少ない

なお、本稿では、受光器で測定される光源からの光の光度 $I_v(\theta, \phi)$ または照度 $E_v(\theta, \phi)$ に対して、鉛直角 θ が変化する回転を鉛直回転、水平角 ϕ が変化する回転を水平回転と呼ぶ。

配光測定では、式(2)~(4)で示されるように、光度測定または光度と照度の逆二乗則を適用した照度測定に基づいた全光束測定を行うため、光源を点光源とみなせる測定条件や、光度と照度の逆二乗則が適用出来る測定条件が必要であり、一般に、光源の10倍以上の十分な測光距離をとる必要がある。大型の照明器具の配光測定を行う場合には、大抵10 m以上の測光距離を必要とする。そのため、多くの配光測定装置は大型となる。受光器は、全光束測定では基本的に $V(\lambda)$ 受光器が用いられる。配光測定装置には、通常、迷光防止のための遮光板が取り付けられている。迷光とは目的とする光以外の入射光のことであり、測定系以外の部分での不要な反射光などが主な要因である。迷光は測光における測定誤差の主要な要因の一つであり、迷光を防ぐため、配光測定は基本的に暗室での測定が行われるほか、遮光カーテン等が併用される。

配光測定装置は、その構造から、(1)光源が回転する

もの、(2) 受光器が動くもの、(3) 平面鏡が回転するもの、の三種類に大別できる^{6),12)}。以下、各タイプの配光測定装置について概説する。

(1) 光源が鉛直軸または水平軸の周りを回転し、受光器が固定されている配光測定装置

このタイプの配光測定装置では、光源が鉛直軸または水平軸の周りを回転するため、光源の点灯姿勢が変化する。光源の回転軸の構造によって、a) 光源が水平可動軸に設置され、水平可動軸を中心に光源が水平回転し、水平可動軸を支持する垂直軸によって光源が鉛直回転するもの(図4 (a))、b) 光源が設置されている可動軸Aと、可動軸Aを支持する可動軸Bの各々が独立に回転する事によって光源が鉛直・水平回転するもの(図4 (b))、c) 光源が設置されている可動軸Cと、可動軸Cを支持する可動軸Dの各々が独立に回転する事によって光源が鉛直・水平回転するもの(図4 (c))の三種類に分けられる。ここで、垂直軸は、光源を設置した可動軸と光源の極軸に垂直な軸である。受光器の位置は固定される。これらのタイプの配光測定装置は、他のタイプと比べて構造が簡単であるが、光源の点灯姿勢が変化するため、測定する光源は点灯姿勢によって配光が変化しないものが望ましい。より正確な配光測定が要求される場合、このタイプの配光測定装置の使用は推奨されない。

(2) 光源の点灯姿勢は変わらず、受光器が動く配光測定装置

このタイプの配光測定装置では、光源は固定位置にあって鉛直軸のまわりに水平回転し、受光器は光源を中心として鉛直面内を移動するものと、光源は固定位置で回転せず、光源を中心とした球面上を受光器が移動するものがある。前者はさらに四種類に分けられ、a) 受光器が水平軸の周りを回転する(図4 (d))、あるいは光源部分とは機械的に独立に受光器が鉛直面内の円軌道を動くもの、b) 鉛直面内に多数の受光器を配置したもの(図4 (e))、c) 光源および受光器がアームの両端にあり光源は点灯姿勢を維持したまま動くもの、d) 光源部分とは機械的に独立に受光器が鉛直面内をまっすぐに動くもの(図4 (f))が存在する。後述するNMIJで用いられている配光測定装置はc)のタイプである。これらのタイプの配光測定装置では、光源は基本的に鉛直軸まわりにもみ回転するため、点灯姿勢を保ったまま配光測定が可能であるが、測光距離を十分長くとるために、比較的奥行きと高さのある部屋が必要になる。b)の装置では、すべての受光器の校正が必要になるが、測定時間は短縮できる。

光源が回転せず、受光器のみが 4π 空間全域をスキャンするような配光測定装置には、ジンバル型やロボット

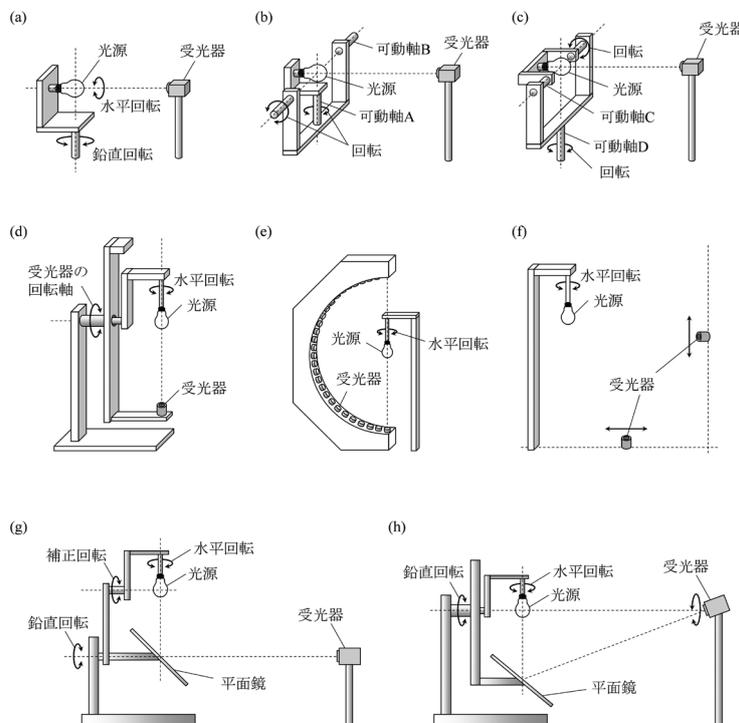


図4 各種配光測定装置の例

アームを用いた配光測定装置が存在する^{17), 18)}。これらの配光測定装置では、光源の点灯姿勢が保たれ、かつ、光源の回転や移動による影響を受けない全光束測定が可能であるが、他と比べても複雑で大掛かりであるため、装置の設計および導入はより難しいものとなる。

(3) 平面鏡が回転する配光測定装置

このタイプの配光測定装置では、平面鏡の回転軸の取り方によって、a) 平面鏡の中心と受光器とを結ぶ線が平面鏡の回転軸となるもの (図4 (g))、b) 光源の測光中心と受光器とを結ぶ線が平面鏡の回転軸となるもの (図4 (h)) の二種類に大別できる。平面鏡は基本的には一枚であるが、複数平面鏡式の配光測定装置も存在する^{19), 20)}。受光器の位置は固定されているが、b) の方式の場合、平面鏡からの反射光が受光器の受光面に垂直に入射するように、平面鏡の回転に合わせて受光器の角度を円錐回転させる機構を有している²¹⁾。迷光防止のため、受光器をトンネル内に設置する手法も取られる。光源は鉛直軸のまわりに水平回転するのみであるため、測定中、光源の点灯姿勢は保たれる。さらに、受光器を配光測定装置から離して設置することで長い測光距離を確保できるため、大型の照明器具の測定が可能である。一方で、平面鏡の状態、具体的には平面鏡の(分光)反射率の波長平坦性および面内分布や経時変化、表面の幾何学的な歪みや偏光による影響等が測定結果に影響するため、注意が必要である。

2.3 球形光束計による全光束測定

全光束測定のもう一つの手法が球形光束計法である。球形光束計の概略を図5に示す。球形光束計は、内壁に白色の拡散反射面の塗装を施した積分球と、受光器、光源の保持具、遮光板、自己吸収補正用の光源からなる。球形光束計による全光束測定もまた古くから用いられている手法であり、測定が簡便で短時間であるため、現在でも全光束測定的手法として広く用いられている。

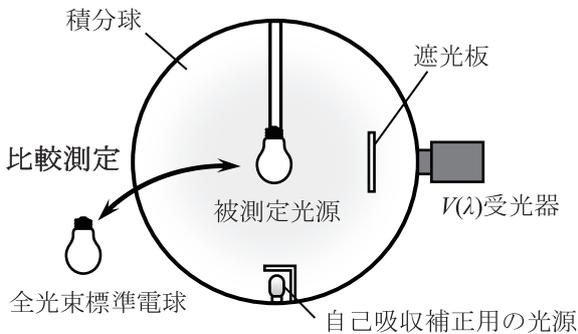


図5 球形光束計

球形光束計を用いた全光束測定の概要は以下のとおりである^{5), 22)}。積分球の中心で光源を点灯したとき、光源からの光放射は積分球内壁で多重反射され、積分球の内壁が均等に照明された状態になる。このときの積分球内壁の平均照度 E_v は、積分球内壁の反射率が波長および積分球内の位置によらず一定である場合は、次式で表されるように、光源の全光束に比例する。

$$E_v = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{\Phi_v}{\pi D^2} \tag{7}$$

ここで、 ρ は積分球内壁の反射率、 Φ_v は光源の全光束、 D は積分球の直径である。式(7)における $\rho/(1-\rho)$ は、光源からの放射が積分球内壁で多重反射することを考慮することで等比級数の和の式から導かれる。このとき、積分球内壁の一部に透過型拡散板等をはめて測光窓とし、受光器を設置すると、式(7)で表される積分球内壁の照度に対する応答、すなわち光源の全光束に比例した応答を得ることができる。ただし、実際の積分球では、多重反射された放射の一部が測光窓から外にでるため、積分球内壁での多重反射は理想的にはならず、厳密には、測光窓の面積と積分球内壁の表面積の比を用いて式(7)を補正する必要がある。その場合、積分球内壁の平均照度 E_v は式(7)より小さくなるが、全光束 Φ_v と積分球内壁の照度 E_v との比例関係は維持される。この原理を用いると、光源の全光束の絶対値は、標準光源との比較測定によって求めることができ、標準光源の全光束を $\Phi_{v,s}$ として、標準光源を点灯したときの内壁の照度を $E_{v,t}$ としたとき、被測定光源の全光束 $\Phi_{v,t}$ は、

$$\Phi_{v,t} = \frac{E_{v,t}}{E_{v,s}} \cdot \Phi_{v,s} \tag{8}$$

となる。このように、球形光束計による全光束測定は、値の比較対象となる標準光源(参照光源)との比較測定となる。

実際の測定では、標準光源を点灯したときの受光器の応答を y_s 、被測定光源を点灯したときの受光器の応答を y_t として、以下の式で被測定光源の全光束を算出する。

$$\Phi_{v,t} = K \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{y_t}{y_s} \cdot \Phi_{v,s} \tag{9}$$

ここで、 K は色補正係数、 α は自己吸収補正係数、 β は配光補正係数と呼ばれる補正係数である。球形光束計が理想的な比較装置として機能した場合、各補正係数はそれぞれ1となる。しかし、現実の測定装置では、積分球内部に設置された遮蔽板などの構造物が光を吸収・反射する障害物となるほか、測光窓からは光の一部が抜けるために、積分球内壁の反射率は積分球内の位置によって異

なり、必ずしも均一ではない。さらに、点灯する光源の配光もまた、全空間で均一ではない。従って、積分球内壁における放射の多重反射が波長および積分球内の位置によらず一定であるような理想条件の実現は不可能であるため、これらの評価が必要となる。

色補正係数 K は、式 (9) の受光器の応答 y_s, y_t に積分球の内壁照度 $E_{v,s}, E_{v,t}$ が正しく反映されないために必要となる補正係数であり、受光器を含めた測定装置の分光応答度 $s(\lambda)$ が分光視感効率 $V(\lambda)$ に完全に一致しない場合に必要である。測光量の測定で用いられる $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度は、色ガラスフィルタを複数組み合わせることで分光視感効率に十分近似するように調節されているものの、完全に一致させることは技術的に不可能であるため、標準光源と被測定光源の分光分布が異なる場合には、上記で得られた全光束値は正しい値から若干ずれる。そのため、以下の式を用いて求めた色補正係数で補正を行う。

$$K = \frac{\int S_s(\lambda)s(\lambda)d\lambda \cdot \int S_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int S_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda \cdot \int S_t(\lambda)s(\lambda)d\lambda} \quad (10)$$

ここで、 $S_s(\lambda)$ は標準光源の分光分布、 $S_t(\lambda)$ は被測定光源の分光分布、 $s(\lambda)$ は受光器を含めた測定装置の相対分光応答度、 $V(\lambda)$ は分光視感効率で、分子と分母に同じ関数が含まれている事から、 $S_s(\lambda)$ 、 $S_t(\lambda)$ 、 $s(\lambda)$ は絶対値である必要はなく、相対値で十分である。色補正は、球形光束計による測定に限らず、 $V(\lambda)$ 受光器を用いた測定において標準光源と被測定光源の分光分布が異なる場合には考慮すべき補正であるが、特に球形光束計を用いた測定の場合は、積分球内壁の反射率が波長によらず一定であるような理想的な場合を除き、積分球と受光器を含めた球形光束計全体の応答度が最終的に得られる受光器の応答に影響する。そのため、式 (10) の比較測定装置の分光応答度 $s(\lambda)$ には、積分球のスループロット（積分球効率）の波長依存性を加味する必要がある。積分球のスループロット $\rho'(\lambda)$ は、積分球内で点灯した光源からの放射が積分球内壁で多重反射してから取り出されることを考慮すると、式 (7) と同様に、積分球内壁の分光反射率 $\rho(\lambda)$ の等比級数の和で表される。すなわち、

$$\rho'(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)} \quad (11)$$

となる。ここでも、測光窓の影響を考慮すると、測光窓の面積と積分球内壁の表面積の比による式 (11) の補正が必要になる。 $\rho'(\lambda)$ を用いると、式 (10) は以下のように書き換えられる。

$$K = \frac{\int S_s(\lambda)s'(\lambda)\rho'(\lambda)d\lambda \cdot \int S_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int S_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda \cdot \int S_t(\lambda)s'(\lambda)\rho'(\lambda)d\lambda} \quad (12)$$

ここで、 $s'(\lambda)$ は積分球に設置されている受光器の相対分光応答度である。

自己吸収補正係数 α は、積分球内部で点灯する標準光源および被測定光源の口金やバルブによる光の吸収の影響を補正するための係数であり、標準光源と被測定光源、積分球内に設置された自己吸収測定用光源を用いて次式で算出される。

$$\alpha = \frac{y_{s1}/y_{s0}}{y_{t1}/y_{t0}} \quad (13)$$

ここで、 y_{s1} は標準光源と同じスペクトルの自己吸収測定用光源を点灯し、標準光源を積分球に設置したときの応答、 y_{s0} は標準光源を設置せずに標準光源と同じスペクトルの自己吸収測定用光源を点灯したときの応答、 y_{t1} は被測定光源と同じスペクトルの自己吸収測定用光源を点灯し、被測定光源を積分球に設置したときの応答、 y_{t0} は被測定光源を設置せずに被測定光源と同じスペクトルの自己吸収測定用光源を点灯したときの応答である。

配光補正係数 β は、光源の配光と、積分球内壁の分光反射率 $\rho(\lambda)$ が均一でないことから必要となる補正係数である。配光補正係数 β は、配光測定によって得られる全光束値と、球形光束計で得られる全光束値との比から算出される。

2.4 日本における全光束標準の現状

2.4.1 NMIJ における全光束標準の具現方法

NMIJ の全光束標準は配光測定によって具現されている。現在の全光束標準の値は、1994 年に導入された極低温放射計を一次標準とした測光量のトレーサビリティ体系に基づいて、極低温放射計にトレーサブルな光度単位と、当時の配光測定装置による配光測定によって具現されたものである²³⁾。当時の配光測定装置は 1980 年前後に導入されたものであり、測光距離は約 1.5 m で、全光束標準電球（東芝：100 V, 200 W）の配光を 5° 間隔で測定することで全光束値を得た。

現在、NMIJ で用いられている配光測定装置²⁴⁾ は、2001 年に製作されたものである（図 6）。この配光測定装置は、回転アーム（全長約 3.0 m）の一方の端に光源を設置し、もう一方の端に受光器を設置する構造になっている。全光束測定の場合は、積分球に $V(\lambda)$ 受光器と $B(\lambda)$ 受光器、 $R(\lambda)$ 受光器を組み合わせた受光器を設置する。 $B(\lambda)$ 受光器は約 455 nm、 $R(\lambda)$ 受光器は約 640 nm で相対分光応答度が最大値となるように検出器と

フィルタを組み合わせた受光器であり、 $B(\lambda)$ 受光器の応答と $R(\lambda)$ の受光器の応答の比（二色比）から、プランク放射に準じた分光分布を持つ全光束標準電球の分布温度を測定するために用いている。ここで、分布温度とは、対象としている相対分光分布が、ある温度の黒体のプランク放射に等しいか近似できる場合の、その黒体の温度である。全光束標準電球などの白熱電球の分光分布はプランク放射に準じるため、点灯した白熱電球の分光分布は分布温度を用いて表現される。受光器から光源までの測光距離は約 2.5 m である。回転アームの回転によって受光器は光源を中心とした鉛直面内を移動し、光源は光源支持シャフトの回転によって水平回転する。光源設置部は、配光測定の際に回転アームの鉛直回転に同期した逆回転（補正回転）をするため、光源の姿勢は一定に保たれる。このような構造により、より省スペースで大きな測光距離を実現している。装置の制御は専用の制御プログラムによって行われ、測定は自動計測で行われる。

NMIJ における全光束標準のトレーサビリティ図を図 7 に示す。全光束標準の上位標準は光度標準であり、配光測定に用いる $V(\lambda)$ 受光器を測光ベンチ上で光度標準電球を用いて校正することによりトレーサビリティが確保されている。このように、仲介用標準として（標準）

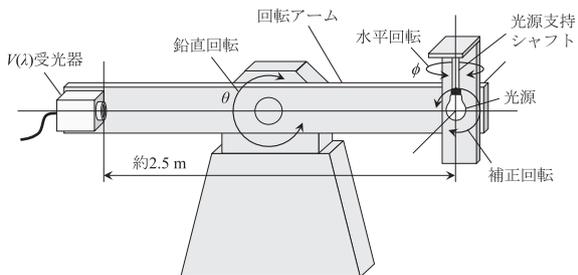


図 6 NMIJ の配光測定装置（写真）と概略図

光源を用いる標準は、光源ベースの標準と呼ばれる。現在の日本の測光量・放射量の一次標準は極低温放射計であり、光度標準もまた、照度応答度、分光応答度と遡り、極低温放射計にトレーサブルとなっている。なお、照度応答度、分光応答度では仲介用標準として検出器が採用されており、このような標準は検出器ベースの標準と呼ばれている。配光測定によって具現された全光束標準は、全光束標準電球（東芝：100 V, 200 W）の全光束値として維持されている。全光束標準電球は群管理されており、測定、校正業務には全光束標準電球から値を移したワーキングスタンダードの全光束標準電球が用いられている。

2.4.2 供給方法

配光測定によって具現された全光束標準電球の全光束値は、球形光束計による比較測定によって供給される。供給範囲は 5 lm-9000 lm であり、拡張不確かさは 0.84 % ($k=2$) である。現在、全光束標準は JCSS 制度による供給体制がとられており、NMIJ は、日本電気計器検定所 (JEMIC) が所有する全光束標準電球（特定副標準器）の校正を直径 1.5 m の球形光束計を用いて行っている。各 JCSS 登録事業者が所有する全光束標準電球（特定二次標準器）は JEMIC による jcss 校正によって校正され、JCSS 登録事業者は、校正された全光束標準電球を元に一般ユーザ向けの校正 (JCSS 校正) を行う。現在、全光束（白熱電球）の認定事業者となっているのは JEMIC を含めて 5 機関である。

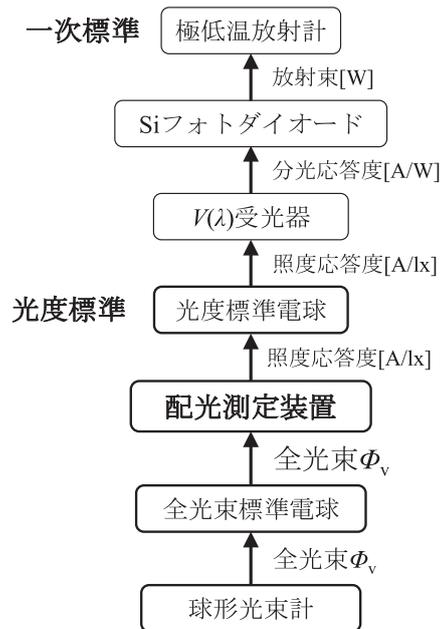


図 7 全光束標準のトレーサビリティ図

2.4.3 国際比較

全光束に関する国際比較は、国際度量衡委員会 (CIPM) の測光・放射測定諮問委員会 (CCPR) による基幹比較 (Key-Comparison : CCPR-K4) として 1997 年から 1999 年にかけて実施された。NMIJ (参加当時はその前身の電子技術総合研究所, ETL) の比較結果²⁵⁾は、国際整合性の目安となる参照値 (Key Comparison Reference Value: KCRV) に対して +0.18 % であった。

2.5 各国 NMI における全光束標準の具現方法

2.5.1 NIST

米国の国家計量標準機関である National Institute of Standards and Technology (NIST) では、Absolute Integrating Sphere Method²⁶⁾ と呼ばれる球形光束計を用いた絶対測定によって全光束標準を具現している。NIST は 1996 年から同手法によって具現された全光束標準の供給を行っており²⁶⁾、現在は、1997 年に導入された 2.5 m の積分球を用いた球形光束計によって全光束標準の具現と供給を行っている²⁷⁾。この手法の特徴は、積分球外部に設置した外部光源から積分球内に入射する光束との比較によって、積分球内の被測定光源の全光束値を決定する点である。外部光源からの光は面積既知の開口から球形光束計に導入され、その入射光の照度から、球形光束計に導入された光の光束が決定される。NIST では検出器ベースのトレーサビリティ体系が導入されており²⁶⁾、全光束標準の上位標準は NIST の照度応答度標準であり、仲介用標準は照度応答度が値付けされた検出器である。外部光源からの入射光の開口部における照度を NIST の照度応答度標準の仲介用検出器で校正することで入射光の光束が校正され、一次標準である NIST の極低温放射計へのトレーサビリティが保たれている。仲介用検出器は経時変化が十分に小さいものを用いており、温度モニターによって応答度の温度依存性を補正できるようにしている。仲介用標準が電球ではなく検出器であるため、電球点灯による経時変化に由来する不確かさを取り除くことができ、全光束標準の不確かさの低減につながっている。加えて、1 回の測定が 15 分程と短いことも²⁷⁾、試験光源および外部光源の経時変化による不確かさを低減し、全光束標準の不確かさの低減につながっている。

現在、CMC (Calibration and Measurement Capabilities) に登録されている NIST の全光束の測定範囲は 0.001 lm から 200 000 lm である (表 2)。拡張不確かさは、0.1 lm から 10 000 lm では 0.5 % ($k=2$) となっている。

2.5.2 NPL

英国の国家計量標準機関である National Physical Laboratory (NPL) では、1970 年頃から配光測定装置による配光測定によって全光束標準の具現を行っている²⁸⁾。現在、NPL では、平面鏡の中心と受光器を結ぶ光軸が平面鏡の回転軸となるタイプ (図 4 (g)) の配光測定装置 (LMT 社製, GO-DS 2000) が導入されている²⁹⁾。測定原理は第 2.2 節に示したものと同様であり、具現された全光束値は NPL の光度標準にトレーサブルである。受光器は光源からの直射光および迷光の侵入を防ぐためトンネル内に設置されており、測光距離は最大で 17 m である。一方で、低パワーの光源の配光測定では、平面鏡を低反射率の素材で覆い平面鏡の中心位置に受光器を設置することで、測光距離約 1.7 m での配光測定を可能としている。

現在、CMC に登録されている NPL の全光束の測定範囲は 1 lm から 20 000 lm であり、拡張不確かさは、100 lm から 20 000 lm で 0.6 % ($k=2$) となっている。

2.5.3 PTB^{17), 18), 30)}

ドイツの国家計量標準機関である Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) は、古くから配光測定によって全光束標準を具現してきた機関である。その具現方法は 1950 年からの手動式の配光測定装置に始まり、1976 年からは受光器が動くタイプであるジンバル型の配光測定装置が用いられてきた。そして 2006 年からは細長い 3 本のロボットアームからなる配光測定装置が用いられている。測定原理は第 2.2 節に示した配光測定による全光束標準の具現方法と同様であり、具現された全光束値は PTB の光度標準にトレーサブルである。

PTB のロボットアームを用いた配光測定装置は、暗室がある建物を含めて配光測定のために設計された大掛かりなものである。各ロボットアームは 8.5 m × 8.5 m

表 2 主要 NMI における全光束標準の CMC 登録リスト

	Measurand Level or Range [lm]	Expanded Uncertainty ($k=2$) [%]
NMIJ	5 ~ 9000	0.84
NIST	0.001 ~ 0.1	2.0 ~ 0.5
	0.1 ~ 10000	0.5
	10000 ~ 200000	0.5 ~ 1.0
NPL	1 ~ 100	0.7 ~ 0.6
	100 ~ 20000	0.6
PTB	0.001 ~ 1	1.5
	1 ~ 100	1.5 ~ 0.6
	100 ~ 10000	0.6
	10000 ~ 100000	0.6 ~ 1.5

× 8.5 m の暗室の 3 箇所 の角に設置されており、最大で測光距離 3 m での測定が可能である。3 本のロボットアームのうち、1 本は光源を支持するためのものであり、測定中、光源の位置は固定される。残りの 2 本は先端に受光器が取り付けられており、光源を中心とした球面の半球上をそれぞれ独立して動き、各方向における球面上の照度を測定する。ロボットアームの受光器は、小型の積分球にシリコンフォトダイオード、三刺激値測定用の各受光器、可視域のスペクトル測定用のマルチチャンネル分光器の入射光学系を取り付けたものであり、色温度の測定、および色補正のためのスペクトルの同時測定が可能である。測定は受光器を停止させずに行われる。光源を支持するロボットアーム、および光源のホルダが死角を最小にするように設計されていることに加え、受光器の測定位置の制限がほとんど無いことから、レーザートラッカーを用いたロボットアームの動作の正確な座標制御と補正による測定の最適化により、不確かさの小さい全光束標準の具現が可能となっている。

この配光測定装置に特徴的であるのが、迷光の評価方法である。他の配光測定装置のように遮光板を用いた迷光測定が不可能であるため、受光器の視野の反対側にある壁の輝度から迷光を見積もるという手法がとられている。見積もられた迷光は、補正項として全光束値の計算に組み込まれる。壁面の輝度測定のための受光器 (“back-looking” photometer と呼ばれている) は 2 本のロボットアームにそれぞれ取り付けられており、光源の全光束測定と同時に壁面の輝度測定を行うことが可能である。

現在、CMC に登録されている PTB の全光束の測定範囲は 0.001 lm から 100 000 lm であり、拡張不確かさは、100 lm から 10 000 lm で 0.6 % ($k=2$) となっている。

3. 光源の全光束評価における現状と課題

3.1 SSL の全光束評価

近年、LED 照明に代表される、固体素子照明 (Solid State Lighting, SSL) の普及が進んできており、それに伴い、SSL の正確な全光束評価が求められている。しかし、従来の光源と SSL との諸々の違いから、従来の標準を用いた測定では正確な全光束測定が難しいという問題が生じている。以下ではそれについて述べる。

まず、SSL の配光特性に由来する問題が挙げられる。ここでは、SSL の例として、LED 電球を取り上げる。LED 電球の構造例を図 8 (a) に示す。LED 電球は、LED を実装した基盤と点灯回路、グローブ、ヒートシ

ンク等からなる。グローブはガラスや樹脂で製造され、透過型拡散板の役割を果たす。白熱電球の例として全光束標準電球 (東芝: 100 V, 200 W) と、複数の市販の LED 電球の配光曲線を図 9 に示す。配光曲線とは、光源の配光を表した曲線であり、図 9 では原点を中心とした極座標を用いて配光曲線を表している。ここで、原点からの距離が光度を表し、極座標の角度は鉛直軸に対する角度を表している。白熱電球である全光束標準電球は、光源の原点からほぼ全空間に向かって光が放射されている。しかし、LED 電球では図 9 のような配光が急峻な製品が多く存在しており、従来の配光測定法では、全光束および配光特性の正確な評価が難しくなっている。球形光束計を用いた全光束測定においても配光の違いは重要な問題であり、内面応答度の空間的な不均一性から、配光の違いが測定結果に影響を及ぼすことが明らかになっている。そのため、球形光束計による比較測定による簡便な全光束評価だけでなく、光源の配光特性評

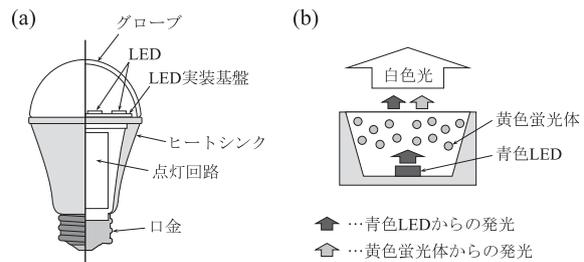


図 8 (a) LED 電球の構造例。(b) 白色 LED の構造例

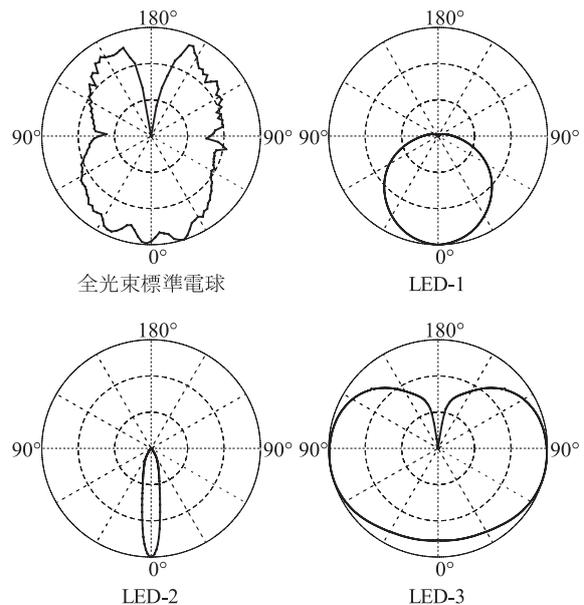


図 9 白熱電球と LED 電球の配光特性

価と配光測定による全光束測定がより重要となっており、正確な測定のための測光技術が求められている。

次に、光源の分光分布に由来する問題が挙げられる。図 10 に白熱電球と複数の白色 LED 電球の分光分布を示す。白熱電球の分光分布は、その発光原理からプランク放射に近似できる。一方で LED では、発光ダイオードからの単色光と蛍光体を組み合わせることで様々な色を作り出すことが可能である。LED 電球に多く用いられる白色 LED では、青色発光ダイオードと黄色の蛍光体を組み合わせているものが主流である（図 8 (b)）。この発光ダイオードと蛍光体の材料の組み合わせは多種多様であり、LED の分光分布もまた多様化している。前述のように、従来の $V(\lambda)$ 受光器を用いた配光測定、球形光束計による全光束測定では、標準光源と被測定光源の分光分布が異なる場合には式 (10) あるいは式 (12) による色補正が必要となる。しかし、式 (12) の色補正係数の算出に必要な球形光束計全体の相対分光応答度や積分球の内面相対分光応答度の測定は簡単ではなく、球形光束計による全光束測定が簡便な全光束測定法として広く用いられているにも関わらず、一般ユーザによる測定においては、SSL の様に分光分布の多様性に富んだ光源に対する式 (12) を用いた色補正係数の算出は事実上不可能である。なお、標準光源の分光分布として、白熱電球の分光分布の代表として CIE により規定されている標準イルミナント A の分光分布を用い、LED を $V(\lambda)$ 受光器で測定した場合の色補正係数を算出すると、 $V(\lambda)$ 受光器の分光視感効率からのずれや LED の分光分布と標準光源の分光分布の違いの度合いによって、色補正係数は 2% 以上となる³¹⁾。したがって、白熱電球である全光束標準電球を標準として SSL の測定を行う場合、色補正係数の算出ができなければ正確な全光束測定は難し

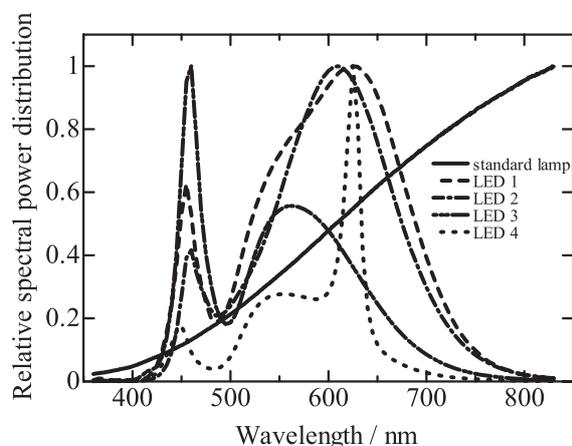


図 10 白熱電球と LED 電球の分光分布

くなる。さらに、全光束に対応する分光分布の標準はこれまで存在していなかったため、SSL に対して、全空間に広がる光の正確な分光分布を球形光束計による比較測定で得ることは非常に困難である。

このことは、SSL に対する光源色の評価も困難としている。ここで、光源色に関わる量としては、色度、相関色温度 (CCT)、黒体軌跡からの偏差 d_{uv} 、演色評価数などが挙げられる。光源の色度評価は、等色関数に近似した分光応答度を持つ受光器で三刺激値を測定する手法（刺激値直読方法）か、光源の分光放射測定に基づいた分光測色方法のどちらかで行われる³²⁾。これまでは、測光量を $V(\lambda)$ 受光器を用いて測定するのと同様に、刺激値直読方法によって三刺激値を求め、色度座標やその他の量を算出する方法が主流であった。しかし、等色関数に完全に一致した分光応答度を持つ受光器を作成することは不可能であることや、SSL の分光分布が多様化したことで、プランク放射と相似の光源を前提とした従来の評価方法では LED 電球の色度や演色性を十分に評価できず、算出される値と実際に人間の目で感じる色や演色にズレが生じるといった問題が出てきている³³⁾。そのため、光源の分光分布に基づいた色の評価が求められている。しかし、分光分布の標準の一つである分光放射照度標準は一方向の光についてのみ分光放射照度が値付けられているため、全空間に広がる光の分光分布の校正に用いるのは難しく、SSL の全光束、および分光分布の評価のための新しい標準が求められている。

3.2 SSL の正確な全光束評価に向けた研究開発

前節で述べた問題を解決するための標準が分光全放射束標準である。分光全放射束標準は、光源から放射される放射束を全空間にわたって積分した量である全放射束の分光密度が校正された標準である。球形光束計による比較測定における、分光全放射束標準を用いた全光束測定方法の概要を図 11 に示す。図 5 では検出器として $V(\lambda)$ 受光器を設置していたが、分光全放射束標準を用いた測定では分光放射計による分光放射測定が行われる。このように積分球に分光放射計を組み合わせた測定系は、分光式球形光束計と呼ばれている。この測定で得られるのは、被測定光源の分光全放射束 $\Phi_e(\lambda)$ である。被測定光源の全光束 Φ_v は、測定した分光全放射束 $\Phi_e(\lambda)$ から、分光視感効率 $V(\lambda)$ と最大視感効果度 K_m を用いて数学的に算出される。

$$\Phi_v = K_m \int_{360}^{830} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

これは、式 (1) の放射量を全放射束、測光量を全光束

とした式そのものである。

分光全放射束標準を用いた光源の全光束測定の利点は次のようなものである。まず、 $V(\lambda)$ 受光器を使用しないために、色補正を行う必要がない。分光式球形光束計全体の分光応答度は、標準光源の分光分布が既知であるために、標準に規定された値と測定値との比較から算出することが可能である。さらに、光源の分光全放射束が測定できるため、光源の分光分布に基づいた色度評価が可能になる。

現在、SSLの正確な評価に向けた測定手法の標準化や規格の制定が世界的に進められている。国際的には、CIEの第2部会「光と放射の物理測定」において、活動している技術委員会（TC）のうち11のTCがLEDに関する内容であり、SSLの試験規格を作成することを目的としたTCであるTC 2-71「LEDランプ、照明器具、モジュールの試験規格」をはじめとして、試験規格の策定や光学特性の特性、不確かさ評価についての技術的検討が行われている³⁴⁾。日本においても、JIS C 8152-1「照明用白色発光ダイオード（LED）の測光方法－第1部：LEDパッケージ」をはじめとして、LED光源の測光を目的とした日本工業規格（JIS）が定められたほか、従来のJISに対してSSLの測光に関する記述を加えるなどの改訂作業が進められている。米国では、北米照明学会（IESNA）が定めた技術文書であるLM-79³⁵⁾がSSLの試験所を認定する上での規準の一つとなっている。これらのSSLの測光に関わる規格では、標準光源として用いられるものの中に分光全放射束標準が明記されている、あるいは明記される予定であり、SSLの測光における標準として分光全放射束標準に対する期待は大きい。

上記の新たな規格において従来と特に異なる点は、球形光束計を用いた測定において、 4π 幾何条件と 2π 幾何条件が記載されている点である³⁵⁾。 4π 幾何条件とは、従来の全光束測定と同様に、光源を積分球の中心で点灯させるものである。一方、 2π 幾何条件とは、光源を積分球

の壁面にあけたポートに設置して点灯し、全光束を測定するものである（図12）。この手法は、光源の前方にのみ光が放射されるような配光を有する光源の全光束測定において、 4π 幾何条件の代わりに採用することができる。とされている。 2π 幾何条件による全光束測定は、 4π 幾何条件による測定と比較して自己吸収の影響を低減できるほか、光が放射されていない光源の後方の空間を積分球で評価する無駄を省くことができる。光源の前方にのみ光が放射されるような配光はSSLに多く、 2π 幾何条件での全光束測定、および分光測定のための標準として、 2π 幾何条件用の分光全放射束標準のニーズも高まっている。

色度評価の重要性に関しては、例えば、米国のNEMA（National Electrical Manufacturers Association）規格において、標準的なLEDの色度区分が定められている（NEMA SSL 3-2010）が、現在のLEDの色度評価における不確かさは大きく、当該規格の色度区分に沿ったLEDの評価への対応には困難が予想される³⁶⁾。さらに、近年、安全性の観点から、紫外線照射用の光源が水銀ランプからLEDで代替されるようになってきている。そのため、紫外域における放射束評価、および分光分布の評価ニーズも高まってきており、分光全放射束標準の紫外域への拡張への対応も求められている。

このように、分光全放射束標準はSSLの全光束および色度の評価において必要不可欠なものとなってきているが、分光全放射束標準を供給しているNMIは、2013年度時点ではNISTとNPLのみである。供給されている標準も 4π 幾何条件用の標準のみであり、NMIによる 2π 幾何条件用の分光全放射束標準は未だ供給されておらず、ユーザが独自に標準を組み立てることで測定が行われているのが現状である。NMIJでは、平成24年度末に 4π 幾何条件用、平成25年度以降に 2π 幾何条件用の分光全放射束標準の供給開始を予定している。なお、分光

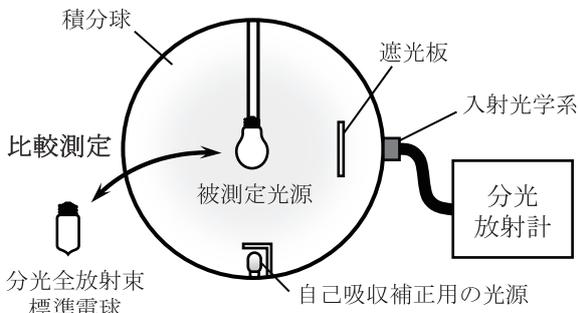


図 11 分光全放射束標準を用いた全光束測定

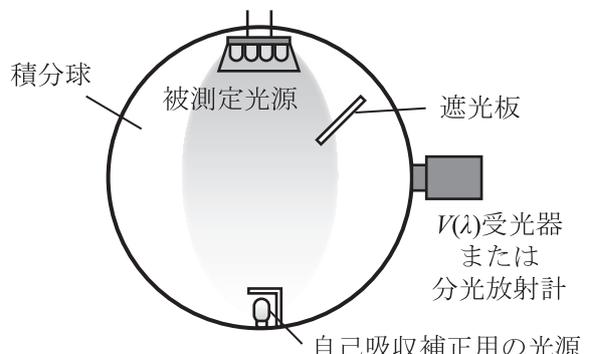


図 12 球形光束計による 2π 幾何条件での全光束測定

全放射束標準の国際比較としては、アジア太平洋計量計画（APMP）での国際比較が計画されている。

4. 分光放射測定に基づく配光特性評価

4.1 分光全放射束標準の具現および校正方法

4.1.1 NMIJ

NMIJにおける分光全放射束標準は、従来の $V(\lambda)$ 受光器を用いた配光測定によって導かれる全光束と、分光放射測定に基づく配光測定によって導かれる相対分光全放射束を組み合わせることで具現される。NMIJにおける分光全放射束標準のトレーサビリティ図を図13(a)に示す。全光束の上位標準は光度標準であり、相対分光全放射束の上位標準は分光放射照度標準である。このようにして分光全放射束標準を組み立てている理由としては、現状の分光放射測定では、後述のスリット関数をはじめとした分光放射計の特性評価方法が確立されていないことなどから、分光測定のみに基づく分光放射束の絶対値の具現は困難であること、光度標準に基づく光源の全光束値から分光全放射束の絶対値を得ることにより従来の全光束標準との値の整合性を確保しやすいこと等が挙げられる。仲介用標準はハロゲン電球（フェニックス電機製、24 V/150 W）であり、分光全放射束標準はこの仲介用標準、すなわち分光全放射束標準電球の分光全放射束値として具現される。

分光全放射束標準電球の相対分光全放射束の測定は、配光測定装置とマルチチャンネル分光器を用いて行われる。配光測定装置の受光器取り付け部には、 $V(\lambda)$ 受光器の代わりに、光ファイバでマルチチャンネル分光器と接続された入射光学系を設置する。このようにして分光測定を可能にした配光測定装置で配光測定を行うことにより、分光全放射束標準電球から各方向に放射される光放射の相対分光放射強度 $I_{e,rel}(\lambda)$ が得られる。相対分光全放射束 $\Phi_{e,rel}(\lambda)$ は、相対分光放射強度を全空間で積分

することによって得られる。

$$\Phi_{e,rel}(\lambda) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_{e,rel}(\theta, \phi, \lambda) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (15)$$

次に、 $V(\lambda)$ 受光器を用いた配光測定による全光束値 Φ_v と相対分光全放射束 $\Phi_{e,rel}(\lambda)$ からスケールファクター k を以下の式で算出する。

$$k = \frac{\Phi_v}{K_m \int \Phi_{e,rel}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (16)$$

分光全放射束の絶対値 $\Phi_e(\lambda)$ は、相対分光全放射束 $\Phi_{e,rel}(\lambda)$ にスケールファクター k をかけることで算出される。

$$\Phi_e(\lambda) = k \cdot \Phi_{e,rel}(\lambda) \quad (17)$$

配光測定装置とマルチチャンネル分光器の校正は、分光放射照度標準電球の点灯台を配光測定装置の光源設置部に取り付け、その上で分光放射照度標準電球を点灯することで行われる。このときの測光距離は、配光測定装置の測光距離（約2.5 m）である。分光放射照度標準電球の放射照度は電球の台座の先端から50 cmの位置で値付けられているため、測光距離に関わらず相対分光放射強度が一定であるという仮定のもと、配光測定装置とマルチチャンネル分光器の相対分光放射照度応答度の値付けを行う。全光束を測定する際は、全光束標準を具現するときと同様に、光度標準電球を用いて $V(\lambda)$ 受光器を測光ベンチ上で校正する。

具現された分光全放射束標準電球の分光全放射束値 $\Phi_e(\lambda)$ の供給は、分光式球形光束計を用いた比較測定によって行われる予定である。NMIJの分光全放射束標準の不確かさバジェットを表3に示す。分光全放射束標準の拡張不確かさは、360~400 nmで4.0%、400~450 nmで3.6%、450~600 nmで3.1%、600~830 nmで3.3%である。

4.1.2 NIST

NISTにおける分光全放射束標準は、NMIJと同じく、

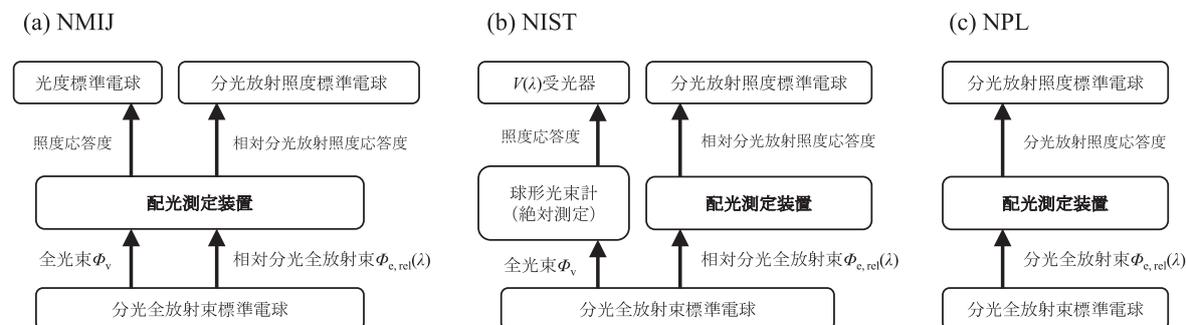


図13 分光全放射束標準のトレーサビリティ図（NMIJ, NIST, NPL）

仲介用標準電球の全光束値と相対分光全放射束値から具現される³⁷⁾(図 13 (b))。全光束値は、NIST の全光束標準の具現方法である Absolute Integrating Sphere Method²⁶⁾によって測定される。このときの外部光源には FEL ランプと呼ばれる型のハロゲン電球が用いられる。外部光源からの入射光の光束は、NIST の照度応答度標準にトレーサブルな仲介用検出器によって入射開口部における照度を測定することで算出される。これによって、積分球に入射した光の光束値は NIST の照度応答度標準にトレーサブルとなり、一次標準である極低温放射計へのトレーサビリティが保たれる。相対分光全放射束の測定には、NIST が作成した測光距離 1.25 m の配光測定装置が用いられる。この配光測定装置は受光器が光源のまわりを回転するタイプであり、光源は固定位置で水平回転する。受光器取り付け部には入射光学系が取り付けられて

おり、光ファイバでマルチチャンネル分光器に接続されている。配光測定装置の校正は、NIST で分光放射照度が値付けられた標準電球 (FEL ランプ) を用いて行われる。測定結果に対しては、分光放射計の直線性と迷光評価に基づいた補正が行われる。仲介用標準電球には 75 W のハロゲン電球が用いられている。このハロゲン電球は CCT が約 3100 K であり、FEL ランプとほぼ同じであるため、分光分布の違いによる影響をキャンセルできるようになっている。

現在、NIST は波長範囲 360 nm から 830 nm で、10 nm 刻みで分光全放射束標準の供給を行っている。供給は、仲介用標準電球への全光束、および各波長における分光全放射束値の値付けによって行われ、校正証明書には、点灯電流・電圧、相関色温度、全光束、分光全放射束の値と、全光束および 10 nm 毎の分光全放射束の不

表 3 NMJ の分光全放射束標準の不確かさバジェット

不確かさ要因	標準不確かさ [%]			
	360 nm ~ 400 nm	400 nm ~ 450 nm	450 nm ~ 600 nm	600 nm ~ 830 nm
分光放射照度標準電球を用いた分光放射計校正に関する不確かさ				
分光放射照度標準電球 (下位ワーキング) の不確かさ	1.64	1.64	1.42	1.52
分光放射照度標準電球の点灯再現性・安定性、分光放射計の安定性	0.51	0.29	0.15	0.1
分光放射照度標準電球の点灯電圧の不確かさ	0.02			
距離 50 cm と距離 2.7 m との相対分光放射照度値の差	0.29			
配光測定装置による参照標準電球の相対分光放射束の不確かさ				
ファイバー屈曲の影響	0.19			
直線性	0.17			
分光放射計の温度依存性	0.08			
点灯電流の測定の不確かさ	<< 0.01	<< 0.01	<< 0.01	<< 0.01
参照標準電球の点灯再現性・安定性、分光放射計の安定性	0.6	0.1	0.1	0.1
迷光 (空間)	0.03			
迷光 (分光)	0.06	0.03	0.03	0.03
波長不確かさ	0.18	0.15	0.05	0.03
スリット幅の影響	0.46	0.23	0.14	0.11
経時変化 (4 時間あたり)	0.05	0.05	0.02	0.03
受光器・標準電球の設置の不確かさ	0.01			
測定角度の再現性	0.05			
測定角度間隔依存性	0.02			
<i>k</i> スケールファクターの不確かさ (全光束の不確かさ)				
全光束値の不確かさ	0.43			
相対分光分布から計算される相対全光束の不確かさ	0.1			
相対合成標準不確かさ	1.99	1.80	1.57	1.65
拡張標準不確かさ (<i>k</i> =2)	4.0	3.6	3.1	3.3

確かさが記載される。NISTの校正証明書に記載されている分光全放射束標準の不確かさバジェットを表4に示す。NISTが供給する分光全放射束の拡張不確かさ ($k=2$) は約2%以下であり、360 nmで1.8%、380 nmで1.5%、430 nmで1.3%、555 nmで1.1%、720 nmで1.0%、830 nmで1.0%である³⁷⁾。

4.1.3 NPL

NPLにおける分光全放射束標準は、マルチチャンネル

分光器を用いた絶対分光配光測定によって具現されている²⁹⁾。トレーサビリティは図13(c)のとおりであり、上位標準は分光放射照度標準のみとなっている。測定で用いられているのは、全光束標準の具現でも用いられている配光測定装置であるが、低反射率の素材で覆った平面鏡の中心部分にマルチチャンネル分光器の入射光学系を取り付けることで分光配光測定を行っている。マルチチャンネル分光器とその入射光学系を取り付けた配光測

表4 NISTの分光全放射束の校正証明書に記載されている不確かさバジェット

Component	Standard uncertainty [%]					
	360 nm	380 nm	430 nm	555 nm	720 nm	830 nm
Uncertainty of scaling factor, k ; i.e., luminous flux of the test lamp (lm)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Total uncertainty of the reference FEL lamp	0.63	0.61	0.51	0.38	0.32	0.30
Uncertainty from performance of the gonio-spectroradiometer						
Mechanical alignment and angle errors of the gonio-spectroradiometer	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Wavelength error of the CCD-array spectrometer (0.2 nm)	0.20	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10
Signal nonlinearity of the CCD-array spectrometer	0.20	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10
Integration-time (IT) related nonlinearity of the CCD-array spectrometer	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Spectral stray light of the CCD-array spectrometer after correction	0.20	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
Dependence of the spectral responsivity of the CCD-array spectrometer on the scanning angle	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Stability of the CCD-array spectrometer (7days)	0.20	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10
Uncertainty from relative spectral calibration of the gonio-spectroradiometer						
Long-term stability of the reference FEL lamp (10-hour calibration cycle)	0.30	0.20	0.15	0.10	0.10	0.10
Spatial uniformity of the reference FEL lamp with respect to the aperture size ($\phi 15$ mm instead of $\phi 11.3$ mm)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Spatial uniformity of the reference FEL lamp with respect to the distance (1.6 m instead of 0.5 m)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Alignment of the reference FEL lamp	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Scattered light (spatial stray light)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Current uncertainty of the reference FEL lamp	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Temporal stability of the reference FEL lamp	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Uncertainty from measurement of the test lamp						
Alignment of the test lamp	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Scattered light (spatial stray light)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Spatial uniformity of the test lamp (10-deg gonio-spectroradiometer scanning interval)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Current uncertainty of the test lamp	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Temporal stability of the test lamp	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
Reproducibility of the test lamp	0.10	0.04	0.02	0.02	0.02	0.10
Relative combined uncertainty of total spectral radiant flux	0.88	0.77	0.64	0.54	0.50	0.50
Relative expanded uncertainty ($k=2$) of total spectral radiant flux	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	1.0

定装置の校正には、NPLの分光放射照度標準で値付けを行った光度標準電球が用いられる。この光度標準電球を配光測定装置に設置し分光放射照度の測定を行うことで、配光測定装置に取り付けた状態のマルチチャンネル分光器への分光放射照度応答度の絶対値の値付けが行われる。このときの測光距離が既知であれば、逆二乗則から分光放射強度の絶対値を測定でき、分光全放射束の測定が可能となる。NPLが供給している分光全放射束標準の波長範囲は350 nmから830 nmであり、具現された分光全放射束標準の拡張不確かさ ($k=2$) は、可視域全体では3.6%以下、とくに450 nm以上では3%以下である²⁹⁾。

4.2 分光放射測定に基づく配光特性評価における技術的課題

分光全放射束標準の具現にあたって重要なのは、分光放射測定に基づく配光測定技術である。分光放射測定と配光測定を組み合わせる測定であることから、それぞれの測定を単体で行う場合とは異なる課題も生じてくる。本節では、まず、分光放射計の特性評価について概観し、各項目における課題を述べる。

4.2.1 配光測定に用いる分光放射計の特性評価^{38), 39)}

分光放射計は、一般に入射光学系、入射スリット、コリメートレンズまたはミラー、分散系（プリズムまたはグレーティング）、フォーカスレンズまたはミラー、出射スリット、および光検出器からなる（図14）。入射スリットは分光器の開口部であり、入射スリットへ光を導入する入射光学系には、通常、ミラー・レンズ等で構成される結像光学系や光ファイバが用いられる。コリメートレンズやコリメートミラーは、入射スリットを通った光を平行光にして分散系に導く役割を持つ。分散系は、コリメートレンズまたはミラーからの入射光を波長ごとに異なる角度で出射する。分散系には、プリズムや回折格子（グレーティング）が用いられる。フォーカスレンズ、フォーカスマイラーは、プリズムや回折格子からの平行光を、分光放射計の出射スリット上に結像する役割を持ち、出射スリットは特定波長の光のみを取り出すために設置される。分光放射計の光検出器には、測定する波長に適した検出器が設置され、検出器としては通常、シリコンフォトダイオードやInGaAsフォトダイオード、光電子増倍管などが用いられる。出射スリットの先に、同一の一連のモノクロメータをさらに置いて2段にしたものをダブルモノクロメータと呼ぶ。この場合、前段のモノクロメータの出射スリットと後段の入射スリットは一つのスリットに統一され、中間スリットと呼ばれる。

ダブルモノクロメータのうち、前段と後段の光学系が中間スリットを境にして鏡像関係になるように配置されたものはゼロ分散型と呼ばれる。前段を通り中間スリットに結像される光は中間スリットの短軸方向に波長分散を有しているが、この光が中間スリットから入射スリットへ向かって前段を逆行した場合、入射スリットに結像される分散はゼロに戻る。ゼロ分散型のダブルモノクロメータでは、この光の逆行という状況を、前段の鏡像関係になるように配置した後段によって作り出している。ダブルモノクロメータでは、後段に入射する光は前段によってある波長（範囲）で既に切り取られた光であるため、出射スリットから得られる光の波長純度を向上でき、目的としない波長以外の光に起因する迷光を低減できる等の利点があるが、出射効率が悪くなるという欠点も有している。なお、出射スリットおよび光検出器をCCDなどのイメージセンサに置き換えたものはマルチチャンネル分光器と呼ばれる。対して、分散系のプリズムや回折格子を回転させて特定の設定波長のみを出射スリットから取り出すタイプの分光器はスキャニング型と呼ばれる。マルチチャンネル分光器では、同時に複数の波長の光に対する応答を得ることができ、測定時間の短縮や効率化が可能である。分光放射測定に基づく配光測定では、一般に、測定時間の短縮を目指してマルチチャンネル分光器が用いられる。

分光放射計の測定波長が A に設定されているとき、測定したい放射量の分光密度が $E(\lambda)$ である入射光に対して分光放射計が示す応答 $R(\lambda)$ は、一般に次の式で表される。

$$R(A) = \int_0^{\infty} \eta(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot g(\lambda, A) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$= \int_0^{\infty} Z(\lambda, A) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda$$
(18)

ここで、 $\eta(\lambda)$ は分光放射計の効率（スループット）、 $s(\lambda)$ は検出器の分光応答度、 $g(\lambda, A)$ は分光放射計のスリット関数である。これら3つの要素をまとめた $Z(\lambda, A) = \eta(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot g(\lambda, A)$ を分光放射計の分光応答度と呼ぶ場合もある。なお、マルチチャンネル分光器にお

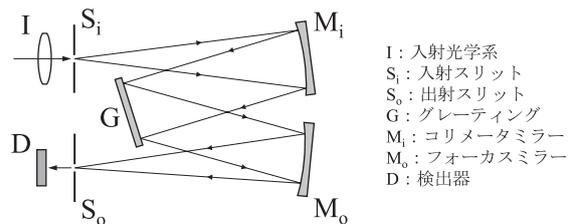


図14 分光放射計の光学配置（例：Czerny-Turner型）

いては、設定波長 A はイメージセンサの各素子に設定された波長に当たり、応答 $R(A)$ は波長 A に設定された素子の応答を意味する。

分光放射計を用いた測定で直接得られるのは $R(A)$ であり、求めたい値は $E(\lambda)$ である。したがって、 $\eta(\lambda)$ 、 $s(\lambda)$ 、および $g(\lambda, A)$ が分かれば、得られた応答 $R(A)$ から、求めたい値 $E(\lambda)$ を算出できることになる。しかし、一般に、分光放射計の効率 $\eta(\lambda)$ 、検出器の応答度 $s(\lambda)$ 、およびスリット関数 $g(\lambda, A)$ を完全に分離して評価することは難しく、得られた応答には迷光や直線性といった不確かさ要因も含まれる。分光分布が正確に分かっている標準光源と、分光分布が標準光源とまったく相似な被測定光源が用意できる場合には、比較測定によって分光放射計の応答度や迷光、直線性などの要因がほぼキャンセルできるが、実際の測定では、そのような状況の実現は難しく、分光測光においては、分光放射計の装置・光学系に依存した分光応答度 $Z(\lambda, A)$ や迷光、直線性や波長精度などの特性評価が不可欠となる。

以下に、いくつかの評価項目とその評価方法を挙げる。

(1) スリット関数

スリット関数 $g(\lambda, A)$ は、入射スリットに入った光放射のうち、波長 λ の光が射出スリットから取り出される割合を示す。なお、ここでは、スリット関数は $\lambda=A$ のとき $g(\lambda, A) \approx 1$ となるように規格化したものとし、分光放射計を構成する光学系や分散系の透過率や反射率といった要素は $\eta(\lambda)$ に含めるものとする。分光放射測定においては三種類の近似が存在する。一つは単色性であり、スリット関数 $g(\lambda, A)$ が、ある波長区間 $A - \Delta A \leq \lambda \leq A + \Delta A$ においてのみ0以上の値をもち、それ以外の区間では $g(\lambda, A) = 0$ となるというものである。第二は平坦性で、この波長区間 $A - \Delta A \leq \lambda \leq A + \Delta A$ では、 $\eta(\lambda)$ 、 $s(\lambda)$ の変化は十分に緩やかで、ほぼ一定とみなせると仮定する。すると、式(18)から $\eta(\lambda)$ および $s(\lambda)$ を定積分の外に出すことができ、

$$R(A) = \eta(A) \cdot s(A) \int_0^{\infty} g(\lambda, A) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (19)$$

となる。 $\eta(A) \cdot s(A)$ は測定する放射によらず、分光放射計の設定波長にのみ依存する。装置に固有の関数である。第三に、標準光源および被測定光源からの光放射 $E_s(\lambda)$ 、 $E_t(\lambda)$ の測定において、装置の場所、方向、偏光、時間などに関する装置の特性はすべて等しいという、等価性の仮定を行う。すると、 $\eta(A) \cdot s(A)$ は標準光源と被測定光源とで共通とみなせるため、分光放射計の応答をそれぞれ $R_s(\lambda)$ 、 $R_t(\lambda)$ とすると、

$$\frac{R_t(A)}{R_s(A)} = \frac{\int_0^{\infty} g(\lambda, A) \cdot E_t(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} g(\lambda, A) \cdot E_s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (20)$$

となり、迷光や直線性といった応答に影響する要因の評価も必要ではあるものの、スリット関数 $g(\lambda, A)$ と分光分布 $E_s(\lambda)$ との関係が分かれば、未知の分光分布 $E_t(\lambda)$ が分かることになる。そのため、分光放射計の分光応答度 $Z(\lambda, A)$ の評価は、実際にはスリット関数 $g(\lambda, A)$ の評価をしているとも言える。

スリット関数の形状は、入射スリットと射出スリットの幅に依存する。マルチチャンネル分光器では、入射スリットとイメージセンサの幅に依存した形状になる。入射スリットを通過した光の断面形状は矩形であり、その光は分散系で分光された後、フォーカスレンズ・フォーカスマイラーによって射出スリット上に矩形の像として結像される。この像は、射出スリットの短軸方向に波長分散を有しており、波長によって射出スリットの短軸方向上の結像位置が異なっている。射出スリットは結像された光の一部を切り出す。ここで切り出されるのは、分光放射計の設定波長 A の光と、設定波長 A の光を中心として射出スリットの幅相当の範囲に結像された光である。つまり、射出スリットから射出される光の分光分布の形状は射出スリット上に結像された像と射出スリットの重なり状態で決まり、設定波長 A を固定した場合のスリット関数は、波長 λ に対して二等辺三角形あるいは台形となる(図15)。実際の装置では、イメージセンサの応答度が完全な矩形でないことや回折・迷光などにより、角が丸くなった形で現れる。このとき、入射、射出スリットの幅、あるいはイメージセンサの幅を狭くすればスリット関数の幅も狭まるが、スリットを通過できる光の絶対量も減少するため、波長 λ に対するスリット関数の幅は必ず有限に設定する必要がある。分光放射測定によって得られる光もまた有限の波長幅を有する。よって、上記の分光で単一の波長を有する光のみを取り出すことは不可能であり、分光放射測定によって得られる光の分光分布は必ずスリット関数の影響を受けることになる。

このように、スリット関数の評価は分光放射計を用いた分光測定において必要不可欠であるが、後述のように、迷光や直線性といった他の特性に比べて評価が難しく、その評価方法の検討もまだ充分ではない。スリット関数は入射光の波長 λ と分光放射計の設定波長 A の関数であるため、スリット関数の評価を行う場合、単色光 E_t の波長 λ と、分光放射計の設定波長 A の一方を固定し、もう一方を掃引して、応答 $R(A)$ のスペクトルを得る(図

16). 具体的な評価方法は主に二種類である⁴⁰⁾。一つは直接法と呼ばれ、波長可変レーザによる単色光を分光放射計に入射させ、波長可変レーザの単色光の波長 λ を装置の測定波長範囲をカバーする範囲で走査することで、各波長の単色光に対する応答を得る^{41), 42)}。このとき、装置側の設定波長は A_j で固定する。各設定波長 A_j に対して得られる応答 R_{A_j} は、装置の分光応答度 $Z(\lambda, A_j)$ を直接反映した形状となる。もう一つは間接法と呼ばれ、He-Neレーザや水銀等の輝線スペクトルといった波長既知の単色光を入射し、装置側の設定波長 A を走査するものである⁴³⁾。入射させた単色光 E_{λ_i} の波長 λ_i に対する応答 $R(A)$ から、 λ_i の入射光に対する設定波長 A の関数としての装置の分光応答度 $Z(\lambda_i, A)$ を得ることができる。ただし、この方法で直接得られる応答は A の関数であるため、直接法で得られる応答とは理想的には鏡像関係になる。これらの方法によって求められる分光放射計の分

光応答度 $Z(\lambda, A)$ は、式(18)から、入射させた一連の単色光 E_{λ_i} と装置の設定波長が A_j であるときの応答 R_{A_j} を関係付ける係数 Z_{A_j, λ_i} を成分とする行列の形で得ることができる。一連の入射光 E_{λ_i} を成分に持つ列ベクトルを E 、応答 R_{A_j} を成分に持つ列ベクトルを R とすると、 E と R は以下の式で結び付けられる。

$$R = \begin{pmatrix} R_{A_1} \\ \vdots \\ R_{A_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{A_1, \lambda_1} & \cdots & Z_{A_1, \lambda_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{A_n, \lambda_1} & \cdots & Z_{A_n, \lambda_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\lambda_1} \\ \vdots \\ E_{\lambda_n} \end{pmatrix} = Z \cdot E \quad (21)$$

Z は $n \times n$ の行列であり、 n は測定する波長点の数であ

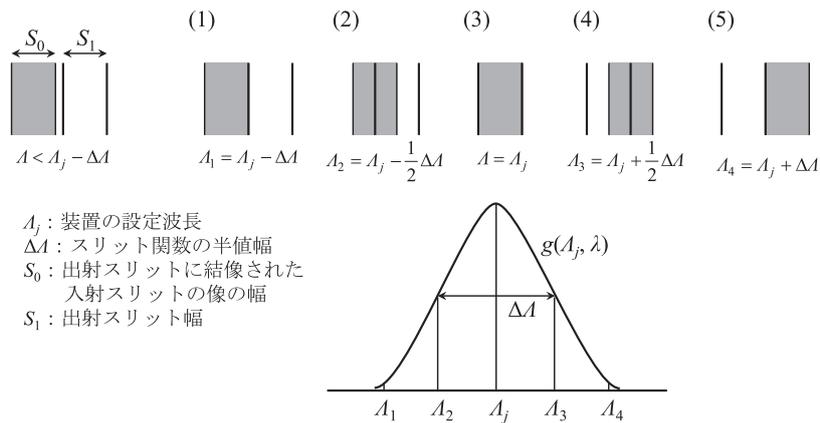


図15 入射、出射スリットとスリット関数の形状⁴⁰⁾

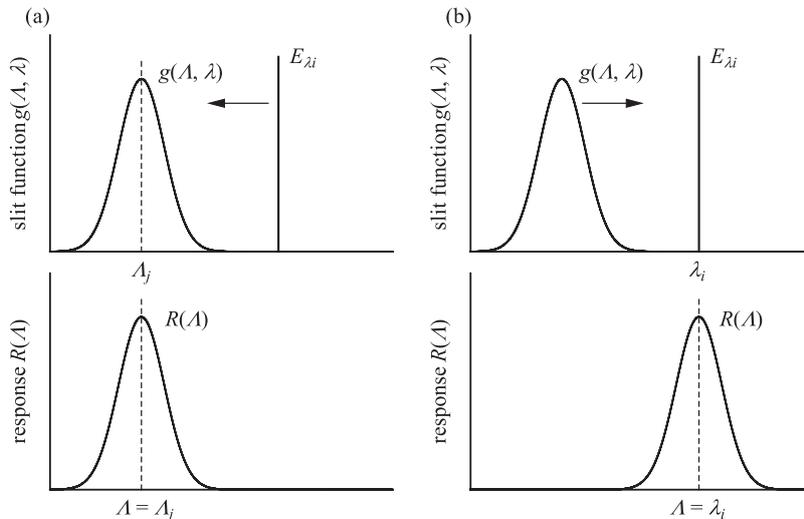


図16 スリット関数と応答の関係

る。 E を入射させた光放射の分光分布とすれば、 R は装置の設定波長 λ_j を走査して得られる分光分布である。逆に、得られた応答 R から入射光の分光分布 E を知りたい場合には、装置の分光応答度 $Z(\lambda, A)$ の逆行列と応答 R との積を求めれば良いことになる。すなわち、次式の Z^{-1} が算出できれば、得られた応答 R から入射光 E を求めることができる。

$$E = Z^{-1} \cdot R \quad (22)$$

上記の二種類の方法で評価したスリット関数あるいは分光応答度は厳密には一致しないが、大抵の場合、どちらの方法をとっても結果が大きく変わることはない。しかし、直接法では波長可変レーザが必要であるため、波長可変レーザを所有していない場合には、より容易な測定法である間接法が用いられる。例として、波長可変レーザの設備を有するNISTでは直接法による評価が行われているが、NMIJでは間接法を採用している。間接法を採用する場合に問題となるのが、用いる輝線の数と得られたデータの解析手法である。輝線の光源には、水銀ランプやネオン、アルゴンの低圧放電ランプ、およびHe-Neレーザが用いられるが、各光源から得られる輝線は数本であり、具体的にどの光源のどの波長の輝線を用いるかについては明確な基準はない。また、少数の波長のデータから可視域を中心とした測定波長範囲にわたってスリット関数を評価するためには、データ点のフィッティングが不可欠である。しかし、具体的な解析手法やフィッティングの関数の最適化に関しては世界的に十分な研究はされておらず今後の課題である。

(2) 迷光

分光放射計を用いた測定の場合、迷光の原因は大きく分けて二種類である。一つは、第2章でも述べた、光源から入射光学系に直接届く光放射以外の放射が、壁などによって反射され入射光学系に入射することによって生じるもの、もう一つは、主に分光放射計に入射した後の光が装置内で散乱され、測定対象ではない波長の光が検出器に入射することで生じるものである。ここでは、後者の迷光を扱う。

分光放射計内で生じる迷光の原因としては、検出器の検出部とその窓材料やフィルタとの多重反射、入射した光が装置の内壁や光学系で散乱することによる散乱光、グレーティングを使用している場合には高次回折光や二重回折光などがある。これらは測定する入射光に由来するものであるため、バックグラウンドの差し引きでは取り除くことができない。さらに、迷光の波長成分は入射光の分光分布にも依存する。そのため、測定結果から迷

光の影響を取り除くには、分光放射計に光が入射したときの迷光の各波長成分を評価する必要がある。一般に、マルチチャンネル分光器では、スキヤニング型よりも迷光の影響が大きく、正確な測定には迷光評価が不可欠である。検出器としてよく用いられているSiフォトダイオードは赤外域により強い応答度を有し、紫外域の応答度が弱いため、赤外域の放射が強い白熱電球などの光源を測定する際にはより注意が必要である。

迷光評価の方法としては、バンドパスフィルタを用いる方法と、輝線や波長可変レーザを用いる方法がある^{29), 41), 42)}。前者の方法は、バンドパスフィルタを用いて検出器に入射する波長範囲を制限し、フィルタの有無による応答の変化から、任意の波長範囲における迷光を評価するものである。別途フィルタの透過率を測定しておけば、フィルタの有無による応答の変化との比較により迷光レベルが決定できる。一方、後者の方法では、スリット関数の評価と同様に、輝線や波長可変レーザを分光放射計に入射することで迷光の評価を行う。このとき、単色光を入射して得られる応答のうち、分光放射計の設定波長を中心とするピークとそれ以外の波長域の応答を分離し、ピーク以外の応答を迷光と考え、ピークに対する迷光の比を評価する。入射光の波長が λ_i であり装置の設定波長が λ_j であるときの応答 R のうち、ピークの応答 R_{IB, λ_j} を成分とする列ベクトルを R_{IB} 、迷光の応答 R_{OB, λ_j} を成分とする列ベクトルを R_{OB} とおき、 R_{IB} と R_{OB} を以下のように関係付ける。

$$R_{OB} = D \cdot R_{IB} \quad (23)$$

ここで、 D は入射光の波長が λ_i であるときのピークの応答 R_{IB, λ_j} と迷光の応答 R_{OB, λ_j} の間の比 $d_{i, j}$ を成分に持つ行列であり、 $R_{OB, \lambda_j} = d_{i, j} \times R_{IB, \lambda_j}$ と表せる。すると、応答 R は、

$$\begin{aligned} R &= R_{IB} + R_{OB} \\ &= R_{IB} + D \cdot R_{IB} = [I + D]R_{IB} = A \cdot R_{IB} \end{aligned} \quad (24)$$

となる。 I は単位行列である。式(24)は、応答 R とピークの応答 R_{IB} との関係を表しており、 A の逆行列 A^{-1} が求めれば、応答 R から迷光が除かれたピークの応答 R_{IB} を求めることができる。

$$R_{IB} = A^{-1} \cdot R \quad (25)$$

この方法においても、スリット関数の評価と同様の問題があり、通常は複数の輝線を用いて評価が行われる。

(3) 直線性

入射光の強度と応答が比例関係にある度合いを直線性

という。直線性は測定における基本的な前提であり、直線性の補正は正確な測定を行うために不可欠である。加えて、光源からの光放射の強度は光源からの方向によって大きく異なるため、配光測定においては広い光放射の強度範囲での直線性評価、および補正が重要となる。

完全な直線性が成り立つ場合、入射光の強度が E_1 , E_2 のときの応答を R_1 と R_2 とすれば、 E_1 , E_2 を同時に入射したときの応答 R_{1+2} については、 $R_{1+2} = R_1 + R_2$ が成り立つ。直線性の評価では、この関係がどの程度成立しているかを確認する。 $R_{1+2} / (R_1 + R_2)$ の値が1に近いほど、その装置の直線性は良いということになる。具体的な手法には、アパーチャやビームスプリッタを用いて分光放射計に入射する光放射の強度を切り替えて、入射光の強度が E_1 , E_2 のときの応答と、 E_1 , E_2 を同時に入射したときの応答 R_{1+2} を測定する重量法が挙げられる^{44), 45)}。前者は double aperture 法とも呼ばれ、二個の開口（アパーチャ）とアパーチャを個別に開閉できるシャッタが取り付けられた遮光板を光源と検出器の間に設置し、一方のアパーチャのみを開けたときの検出器の応答をそれぞれ R_1 と R_2 、両方のアパーチャを開けたときの検出器の応答を R_{1+2} とし、 $R_{1+2} / (R_1 + R_2)$ の値から直線性を評価する。ビームスプリッタを用いる場合は、レーザー光などの入射光をビームスプリッタなどで二つの経路に分岐させ、一方の経路からのレーザーのみを入射したときの応答 R_1 と R_2 と、両方の経路からのレーザー光を同時に入射したときの応答 R_{1+2} から直線性を評価する。

なお、分光放射計の直線性には、入射光強度に対する直線性だけでなく、積算時間に対する直線性が存在する^{46), 47)}。入射光強度を一定としたとき、得られる応答の強度は理想的には装置の積算時間に比例する。しかし、現実には積算時間と応答の比例関係は完全ではなく、積算時間に対する応答の直線性評価が必要となる。このことを考慮すると、先に述べた入射光強度に対する直線性は、各積算時間に対して評価されなければならない。さらに、直線性の波長依存性の考慮も重要であり、光源に単色光を用いる、イメージセンサの各ピクセルの直線性評価を行うといったことも必要となる。NMIJ の不確かさプロジェクトでは、これらの各直線性を個別に評価したうえで、積分時間を問わず、全波長域でのマルチチャンネル型分光器の応答直線性を 0.17 % としている。一方 NIST の不確かさプロジェクトでは、入射光強度と積分時間のそれぞれに対する直線性の不確かさを波長域ごとに記している。

(4) 波長精度

分光放射計では、装置で設定された波長と、実際に分

光されて取り出された光の代表的な波長（ピーク波長や重心波長など）が一致しているか、イメージセンサの場合は各ピクセルにどの波長が設定されているのかを評価する必要がある。ここでも、波長可変レーザや輝線を用いて波長既知の単色光を入射し、入射光、あるいは装置の設定波長を走査したときの応答から、装置の設定波長と得られる分光分布との関係性を評価する。このとき、ピーク波長や重心波長の決定方法という問題が生じ、スリット関数の評価と同様にフィッティング方法による差異が現れる。

スキヤニング型の場合、波長スキヤンは分散素子である回折格子やプリズムを回転させる事で行われるが、分散素子の回転角と設定波長との関係性は非線形であるため、波長スキヤンには設定波長を機械的に設定するための特別な機構が使用される事が多く、所定の非線形応答をする機械的な回転機構を用いて分散素子を回転させて波長スキヤンを行う方法が多く用いられる。分散素子として回折格子が用いられている場合は、サインバーと呼ばれる機械的な回転機構が用いられる事が多く、これによって装置の波長設定をある程度正確に行うことが可能である。一方、マルチチャンネル分光器では、イメージセンサのピクセルが等間隔で並んでいるのに対し、各ピクセルに入射する光の波長間隔は一般に一定間隔ではない。そのため、各ピクセルに割り当てられる波長の間隔は一定でなく、各ピクセルに対応する波長をそれぞれ求める必要があり、波長の補完方法や用いる単色光の波長の検討が必要になる等、波長とその精度の評価は比較的難しくなる。

以上の特性評価においては、分光放射計の温度特性および安定性にも注意する必要がある^{46), 47)}。とくに、配光測定は測定角度間隔によっては一時間以上の測定時間を要するため、測定中の温度、湿度変化や装置の安定性が測定結果に影響を及ぼすことがある。温度および湿度を管理した暗室内での測定においても、室内に温度分布が存在することや光源が熱源であること、光源と受光部の位置関係が変化し続ける測定であることから、測定中の入射光学系や分光放射計の周囲環境は必ずしも一定ではない。そのため、分光放射計の温度特性をあらかじめ確認しておくだけでなく、装置の直線性や波長校正への温度の影響を評価することが必要と考えられる。

なお、分光放射計から理想的な単色光を得ることは不可能であっても、得られる応答と入射光との関連付けができていれば、入射光の分光分布の評価をすることが可能である。分光放射計の特性評価、および実際の測定は、

そのような考えに基づいて行われている。

4.2.2 分光全放射束標準の不確かさ

分光全放射束標準の不確かさは、配光測定および全光束測定に由来するものと、分光放射測定に由来するものに大きく分けられ、さらに、光源の点灯再現性や経時変化などの光源そのものに由来する不確かさ要因が加えられる(表3,表4)。配光測定および全光束測定に由来する不確かさとしては、光度標準による $V(\lambda)$ 受光器校正の不確かさや、測光距離、角度再現性、温度依存性などが挙げられる。分光放射測定に由来するものとしては、分光情報の標準となる分光放射照度標準が持つ不確かさや、分光放射計が有する不確かさ、すなわち迷光や直線性、温度依存性、波長校正による不確かさなどが挙げられる。なお、他の要因と比較して分光放射照度標準の不確かさは大きく、NISTやNPLの分光全放射束標準においても不確かさに対する寄与が最も大きくなっている。

分光全放射束標準を用いて被測定光源の分光全放射束を決定し、その値から全光束を算出する場合には、不確かさの相関が問題となる。従来の $V(\lambda)$ 受光器を用いた測定では、測光量が直接応答として得られていた。しかし、分光放射測定で直接得られるのは放射量の分光密度に対応する応答であり、測光量を得るためには測定されたデータをもとに波長に対して数値積分を行わなくてはならない。放射量の分光密度は黒体放射を元に決定された分光放射照度に基づいて決められているため、各波長における放射量の分光密度、およびその不確かさには波長間の相関があると考えられ、不確かさの合成においては波長間の相関を考慮しなくてはならない。しかしながら、波長間の相関を決定するには分光放射照度の値付けをしている際の黒体温度が一定である、もしくはその変動等をリアルタイムで評価する必要がある、現実的には困難である。分光全放射束から全光束の不確かさを計算する場合、完全相関として計算を行う場合と、非完全相関として計算を行う場合では、得られる不確かさが大きく異なる。分光全放射束から全光束を計算する場合の不確かさの計算方法は、今後検討が必要になると考えられる。

5. 分光全放射束標準の確立・供給における今後の課題

本章では、NMIJにおいて分光全放射束標準を確立、供給していくにあたっての今後の課題を述べる。

5.1 配光測定・分光放射測定の高度化

配光測定および分光放射測定の高度化は、分光全放射

束標準を用いた光源の全光束評価を行う上で不可欠である。まず、配光測定に関しては、SSLのさまざまな配光特性に対して測定の最適化が必要と考えられる。第3章でも述べたように、SSLの配光特性は狭配光のものから従来光源に近いものまでさまざまな製品が存在している。従来光源はソケット部分を除いてほぼ全方向に光が放射されるものが多く、とくに急峻な配光に対してどのような角度間隔で配光測定を行えば十分正確な測定が行えるのかといった検討は十分になされていない。加えて、配光が未知の光源を測定する場合には、どのような角度間隔で測定を行うのか限られた時間の中で見積もらなければならない、測定にかかる負担は増加する。従来の白熱電球を含めた配光測定における大きな問題は測定時間であり、点灯による光源の消耗を考えれば、できるだけ短時間で測定を終わらせることが望ましい。

SSL光源の分光配光測定に基づいて、より短い測定時間で十分に正確な全光束の測定結果を得るための改善案として、配光特性に応じた測定角度間隔の最適化が挙げられる。現在主流となっている球帯係数法は一定の間隔で鉛直角を分割しているが、配光によっては、細かく測定する必要のある角度範囲は一部であり、それ以外の範囲はより粗い間隔で測定しても問題ない場合がある。例として、急峻な配光であることが分かっている光源の全光束測定を行う場合、光源の前方、とくに光度の強い方向では鉛直方向の測定角度間隔を $\Delta\theta=1^\circ$ とし、光がほとんど放射されていない光源の後方では $\Delta\theta=5^\circ$ あるいは 10° としても、得られる全光束値には大きな影響がないと考えられる。さらに、ラッセル角法や山内角法で用いられているような立体角に基づいた測定角度の検討を行うことで、より少ない測定点数で十分に正確な全光束値の算出が可能になると考えられる。配光に対して最適な測定条件の探索を行うには、さまざまな配光パターンに対して複数の測定角度間隔でのサンプリングを行い、得られる全光束値の比較を行うことが有効である。さらに、サンプリングしたデータのフィッティング関数を最適化することにより、逆に、少ない測定点から、配光未知の光源に対して全光束測定の測定条件の指針を得ることができ、配光測定の効率化が図れると考えられる。

配光測定の高度化は従来の全光束標準の高度化にもつながると考えられる。全光束標準電球や分光全放射束標準電球はフィラメントによる光源であるため、その配光特性はフィラメント形状に依存し、凹凸が大きい。一方で、LEDは点光源に近く、さらに図8(a)のようなグローブや、LEDの封入剤、配光を調節するために設置されるレンズや反射板等の効果により配光は滑らかである。

配光が滑らかではあるが急峻なものから後方にまで光が放射されるものまである LED 電球と、ほぼ全方向に光が放射されるが配光特性の凸凹が大きい白熱電球のどちらを測定するにしても、配光測定の最適化により、得られる全光束値の正確さの向上と不確かさの改善が見込まれる。

次に、分光放射測定の高度化である。第4章で述べたように、分光放射計の特性評価においては、多くの場合波長可変レーザーや輝線からの単色光の利用が必須である。しかしながら、波長可変レーザーの場合には設備の導入の問題、輝線の場合にはどの光源のどの波長のものを使うか、どのような解析を行うかといった点が最適化されていないという問題がある。当然、分光放射計の特性は個々の装置によって異なるため、試験所やユーザー側でも使用する分光放射計の正確な特性評価が行えることが望ましい。そのため、波長可変レーザー等の設備の整った環境下での厳密な特性評価手法の開発と同時に、最高レベルの不確かさの実現を必ずしも必要としないユーザー向けの簡便な評価方法、たとえば、輝線等を用いた特性評価手法の開発等が求められる。フィルタを利用した分光評価や直線性評価、およびそれらの補正は、波長間隔やフィルタの組み合わせによって測定に手間がかかることを除けば比較的容易に行うことができ、十分に有効な手法であるが、フィルタを使用することによって検出器への入射光の強度が弱まるという欠点がある。また、分光放射計から得られるデータは、付属しているソフトウェアによって補正されている場合もあり、その補正方法も製品によって異なることにも注意が必要である。

以上に述べた通り、分光放射測定に基づく配光測定およびその不確かさ評価を正確に行うに際しては技術的に難しい課題が多く、さらなる技術的な向上を目指す必要があると考えられる。

なお、照明器具の全光束測定においては、大型の照明器具は球形光束計による全光束測定が困難であり、SSLを用いた照明器具では光源と器具を分離できないものも多く、従来の光源や照明器具と比べ、配光測定による全光束測定が求められるケースが多くなってきている。ユーザーや認定を受けようと考えている試験所が配光測定あるいは分光配光測定を導入しようとする場合、測光に対する知識、技術はもちろん、測定の不確かさ評価を適切に行う能力も求められ、配光測定・分光放射測定の高度化に加え、能力向上も重要な課題である。米国では、米国エネルギー省 (United States Department of Energy, DoE) が主導している SSL の普及、評価技術の向上を目指した CALiPER program において配光測定や球形光

束計による測定のバジェットシートが公開されるなど⁴⁸⁾、配光測定の不確かさ評価の能力向上に向けて精力的な活動が行われている。

5.2 トレーサビリティ体系

NMIJ や NIST における分光全放射束標準の具現方法では、分光全放射束の絶対値を光度標準から、相対分光分布を分光放射照度標準から得ている。この手法では、絶対分光測定における分光放射計の特性評価の問題を回避しているものの、具現方法が複雑になっており、最終的な不確かさは二つの標準の不確かさを合成したものとなる。特に、NMIJ では上位標準となる光度標準から導出される全光束の不確かさ、および分光放射照度標準電球の不確かさは、どちらも NIST のそれよりも大きく、分光全放射束の不確かさにも大きく寄与している。そのため、現状の分光全放射束標準の不確かさを改善するには、上位標準の不確かさを改善する、あるいはトレーサビリティ体系の見直しが必要になると考えられる。

トレーサビリティの改善案として考えられるのは、絶対分光配光測定によって分光放射照度標準のみから分光全放射束標準を具現し、全光束標準の不確かさの影響を取り除くというものである。具体的な手法としては二つの案が挙げられる (図 17)。一つは NPL で行われているような、配光測定装置に設置可能な電球に分光放射照度標準を用いて分光放射照度の絶対値の値付けを行い、その電球を用いて配光測定装置の校正を行う手法である。配光測定装置の校正は、電球の分光放射照度の絶対値が値付けられた方向の光が配光測定装置の入射光学系に入射するように電球を設置して行う。このときの測光距離と、被測定光源の配光測定を行うときの測光距離と一致させることで、被測定光源の絶対分光放射測定を行うことが可能である。もう一つの方法は、分光放射照度の絶対値が値付けられている 50 cm の距離で配光測定装置の校正を行い、絶対分光放射測定を行うという方法である。分光放射照度標準電球は、電球の台の先から 50 cm の位置での分光放射照度が値付けられているため、分光放射照度標準電球をもとにして絶対分光放射測定を行うには、入射光学系を 50 cm の位置に置く必要がある。しかし、この方法の場合、入射光学系と分光放射照度標準電球の距離が近いため、分光放射照度標準電球からの放射と被測定光源からの放射の入射光学系に対する入射条件は一致せず、入射条件の違いによる測定系の応答の違いは完全に無視できないため、そのことによる補正が必要となる可能性がある。

ただし、現在の NMIJ の分光放射照度標準の不確かさ

は、可視域 (360–830 nm) で波長域に応じて 2.8%–3.2% ($k=2$) と比較的大きいため、分光放射照度標準のみから分光全放射束標準を具現しても分光全放射束標準の不確かさを大幅に改善することは難しいという問題もある。NPL の方式を採用したとしても、CMC に登録されている NPL の分光放射照度標準の拡張不確かさ ($k=2$) は 300–400 nm で 1.3%, 400–700 nm で 1.3–0.6% である一方で、分光全放射束標準の拡張不確かさ ($k=2$) は 450 nm 以上でも 3% 以下となっていることから、分光放射計による絶対分光測定において不確かさを小さくすることは難しい課題であると考えられる。さらに、必要になる装置、負担等を勘案すると、分光放射計の絶対校正までを行うには様々な課題がある。このことは、分光放射計の特性評価の難しさも合わせて、分光測定を難しくしている一因である。

光度標準と分光放射照度標準の上位標準が異なる点も考慮すべき問題である。分光全放射束標準のトレーサビリティ体系は従来の全光束標準と矛盾しないように作られているべきである。従来の全光束標準は光度標準から作られているが、光度標準は極低温放射計を一次標準とした体系から作られているのに対して、分光放射照度標準は温度から分光放射輝度が決定可能な高温黒体炉から導かれており、その温度は国際温度目盛 (ITS-90)⁴⁹⁸⁾ を上位標準としている。そのため、NMIJ や NIST の手法のように光度標準から絶対値を得る場合と、分光放射照度標準を用いて絶対分光放射測定を行った場合とで、最終的に得られる全光束値が不確かさの範囲で一致するかを十分に検討しなければならない。

5.3 仲介用標準光源の選定と供給

放射量、測光量の標準供給において特徴的であるのが、いくつかの標準の供給において仲介用標準に電球が用いられることである。ある光源を仲介用標準光源とし

て用いるには、点灯の安定性や再現性が良い (質の良い) 光源であること、測定対象の波長範囲を十分にカバーする強度を有していること、とくに分光放射測定においては測定対象の波長範囲でできるだけ滑らかな分光分布を有することなどが条件となる。加えて、全光束標準電球では、配光が全空間でできるだけ均一であることが望ましい。一方で、電球は点灯するたびに必ず消耗するため、群管理による点灯時間の管理と定期的な校正、買い替えは不可欠である。

光度標準や全光束標準では、光度標準電球や全光束標準電球が標準電球として特別に生産され、利用されている。これらの標準電球は、市販の電球と比較して点灯の安定性や再現性が非常に良く、値を維持するのに適した質の良い電球である。しかしながら、近年、白熱電球の生産は縮小し、標準電球を生産するための技術、たとえば厚みが均一で気泡や脈利のないバルブの製造といった技術を維持していくことが難しくなっており、標準電球として用いることのできる質の良い白熱電球の入手は今後ますます困難になると予想される。光度標準では、NIST のように検出器ベースのトレーサビリティ体系を構築できれば、絶対値が値付けされた仲介用標準光源を用いずに標準供給を行うことが可能である。しかし、全光束標準では、全空間に広がる光放射を扱う関係上、光源ベースでの標準供給が望ましく、仲介用標準光源が必要となる。したがって、仲介用標準光源の確保は標準供給において大きな問題となっている。LED 光源を新たな標準光源として用いることも検討され始めているが、現在の LED 光源は標準光源として求められる性能を満たしておらず、白熱電球の代わりに標準光源として用いるには、分光分布が可視域全般に広がっているなどの特性を有した新規 LED 光源の開発が不可欠である。

4 π 放射光源用の分光全放射束標準は、分光全放射束値が校正されたハロゲン電球を仲介用標準光源として用い

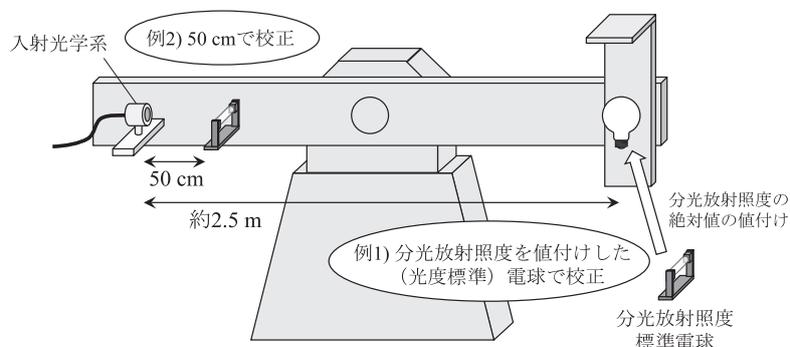


図 17 分光放射照度標準のみから分光全放射束標準を具現する手法の案

る。ハロゲン電球が用いられるのは、色温度が約 3000 K と白熱電球 (2800 K 前後) よりも高温であることから、青色から紫外域の放射強度が比較的強いことや、バルブに石英ガラスを使用していることから短波長域でもバルブが十分な透過率を有することなどから、SSL の分光全放射束評価における標準光源として白熱電球よりもふさわしいためである。仲介用標準として予定されているハロゲン電球は市販品であるが、点灯電流や点灯電圧、光束値の経時変化などの特性が良好なものを選出しており、エージング処理後、仲介用標準光源として使用される。しかし、標準光源として選定したハロゲン電球も生産が継続される保証は無く、今後も市販の電球の特性評価を行い、仲介用標準として用いることのできる光源の選別を行っていく必要がある。同様に、開発予定の 2π 放射光源用の分光全放射束標準光源に用いる光源も、光源の種類や形状、配光特性、スペクトル形状や光源の安定性など、 2π 放射光源の全光束測定に適した特性の光源を探索する必要がある。とくに、従来とは異なり光源の前方にのみ光が放射される光源のための標準であるため、標準光源として適した配光特性の検討が求められる。

6. まとめ

本調査研究では、光源の全光束評価に不可欠な全光束標準、および分光全放射束標準と、それら標準の確立・供給に必要となる配光測定技術および分光放射測定に基づく配光測定技術について調査を行った。現在、世界的に SSL の普及が進み、光源および照明器具に関する新たな規格や制度の策定が行われる中で、光源の正確な全光束測定および光源色測定に対するニーズは高まっている。多様な分光分布、配光特性を有する SSL の全光束や色度等の評価には、分光全放射束標準が不可欠である。しかし、分光全放射束標準の具現・供給のためには、従来の配光測定技術の高度化に加え、分光放射測定による配光測定技術の高度化、トレーサビリティや不確かさの改善、仲介用標準光源の評価や選定といった課題が残されている。測定技術の高度化については、測定角度間隔の配光に対する最適化や、分光放射計の特性評価手法の改良が必要になると考えられる。分光全放射束標準のトレーサビリティおよび不確かさについては、絶対分光放射測定による具現方法により改善できる可能性があり、検討を進める必要がある。さらに、 2π 放射光源用分光全放射束標準は世界でも供給を開始している NMI はなく、その具現と供給には早急な対応が望まれている。

測定技術の高度化や改良は業界での分光配光測定の高度化にもつながると考えられ、一連の標準開発、測定技術の向上により、配光測定および分光放射測定による SSL 光源の正確な全光束測定が可能になると期待される。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導を賜りました光放射計測科の座間達也科長に厚く御礼申し上げます。光放射標準研究室の神門賢二主任研究員、ならびに光放射標準研究室の皆様には、多くのご指導、ご助言を賜りましたことを心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 財団法人日本環境協会エコマーク事務局：エコマーク商品類型 No.150「電球形 LED ランプ (A 形) Version 1.0」, <http://www.ecomark.jp/nintei/150.html>
- 2) 経済産業省 Web ページ : <http://www.meti.go.jp/>
- 3) Energy Star プログラム Web ページ : <http://www.energystar.gov/>
- 4) G. Wyszecki, W. R. Blevin, K. G. Kessler, K. D. Mielenz, Principles governing photometry, BIPM, Monographie 83/1 (1983).
- 5) "The measurement of luminous flux", CIE Publication No.84 (1989).
- 6) "The measurement of absolute luminous intensity distributions", CIE publication No.70 (1987).
- 7) A. R. Schaefer and K. Mohan: A New Goniometer for Total Flux Measurements, J. Illum. Eng. Soc., 3, 4 (1974) 349-353.
- 8) W. J. Brown: Realization of the NML Scale of Total Luminous Flux, Metrologia, 15, 4 (1979) 167-171.
- 9) M. E. Thain and F. Hengstberger: A new goniophotometer for the calibration of small luminous flux standard lamps, J. Phys. E: Sci. Instrum., 15, 6 (1982) 675-678.
- 10) C. Gentile, M. L. Rastello, G. Rossi and P. Soardo: Luminous flux measurement, Lighting Res. Tech. 20, 4 (1988) 189-193.
- 11) F. Sametoglu: Construction of Two-Axis Goniophotometer for Measurement of Spatial Distribution of a Light Source and Calculation of Luminous Flux, 119, 6 (2011) 783-791.

- 12) JIS C 8105-5 : 2011 照明器具—第 5 部 : 配光測定方法, 日本規格協会 (2011).
- 13) 社団法人照明学会編 : 光の計測マニュアル (日本理工出版会, 1990) 211-214.
- 14) Y. Kurioka: Accuracy and Precision of Different Kinds of Methods for Total Flux Integration, *J. Illum. Eng. Inst. Japan*, 48, 9 (1964) 436-444.
- 15) J. S. Franklin: Automated Universal Distribution Photometer, *Illum. Engin.*, 53, 12 (1958) 667-678.
- 16) 社団法人照明学会編 : 光の計測マニュアル (日本理工出版会, 1990) 187-193.
- 17) M. Lindemann, R. Maass and G. Sauter: A Brief History of Traceable Goniophotometry at PTB, *Proc. of the 27th Session (CIE, Sun City, South Africa, July 9-16, 2011)* 160-177.
- 18) G. Sauter: Goniophotometry: new calibration method and instrument design, *Metrologia*, 32 (1995/96) 685-688.
- 19) Y. Kurioka: Light Distribution Photometry in Japan, *Appl. Opt.*, 10, 12 (1971) 2600-2606.
- 20) V. F. Muñoz-Martínez, J. Serón-Barba, R. Molina-Mesa, J.M. Gómez-de-Gabriel, J. Fernández-Lozano and A. García-Cerezo: Double reflection goniophotometer, *Metrologia*, 43, 3 (2006) 185-194.
- 21) 池田忠彦 : 照明用大型配光測定システム, 月間ディスプレイ 12月号 (2010) 71-75.
- 22) D. G. Goebel: Generalized Integrating-Sphere Theory, *Appl. Opt.*, 6, 1 (1967) 125-128.
- 23) 小貫英雄, 齊藤一朗, 薮洋司, 側垣博明, 三嶋泰雄 : 光放射標準と計測技術の研究 ; 測光・放射標準, 電子技術総合研究所彙報, 第 64 巻, 第 8 号 (2000) 57-63.
- 24) 薮洋司, 齊藤一朗 : 配光測定に基づく全光束絶対校正装置の開発 - 全光束標準の現状と高精度化に向けた取り組み -, 光アライアンス, 第 15 巻, 第 3 号 (2004) 1-7.
- 25) G. Sauter, D. Lindner and M. Lindemann: CCPR key comparisons K3a of luminous intensity and K4 of luminous flux with lamps as transfer standards, *PTB-Opt-62* (1999) 62.
- 26) Y. Ohno: Photometric Calibrations, *NIST Special Publication* 250-37 (1997).
- 27) Y. Ohno: Detector-based luminous-flux calibration using the Absolute Integrating-Sphere Method, *Metrologia*, 35, 4 (1998) 473-478.
- 28) O. C. Jones and R. G. Berry: A New Determination of the Lumen, *Metrologia*, 6, 3 (1970) 81-89.
- 29) M. Shaw and T. Goodman: Array-based goniospectroradiometer for measurement of spectral radiant intensity and spectral total flux of light sources, *Appl. Opt.*, 47, 14 (2008) 2637-2647.
- 30) G. Bizjak, M. Lindemann, A. Sperling and G. Sauter: Determination of Stray Light at the PTB Goniophotometer Facility, *MAPAN -Journal of Metrology Society of India*, 24, 3 (2009) 163-173.
- 31) U. Krüger and P. Blatter: Spectral Mismatch Correction Factor Estimation for White LED Spectra Based on the Photometer's f_1 Value, *Proc. of the CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light" (CIE, Paris, France, April 15-16, 2013)* 300-307.
- 32) "Colorimetry", *CIE Publication No.15, 3rd Edition* (2004).
- 33) W. Davis and Y. Ohno: Color quality scale, *Opt. Eng.*, 49, 3 (2010) 033602.
- 34) 薮洋司 : LED 照明の測光方法に関する国際標準化の動向, 照明学会誌, 第 96 巻, 第 6 号 (2012) 337-342.
- 35) LM-79-08 "Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products", *IESNA Testing Procedures Committee* (2008).
- 36) NEMA SSL 3-2010 "High-Power White LED Binning for General Illumination", *National Electrical Manufacturers Association* (2010).
- 37) Y. Zong and Y. Ohno: Realization of total spectral radiant flux scale and calibration service at NIST, *Proc. of CIE 26th session (CIE, Beijing, China, July 4-11, 2007)* D2-179 to D2-182.
- 38) 社団法人照明学会編 : 光の計測マニュアル (日本理工出版会, 1990) 256-371.
- 39) 浜松ホトニクス株式会社 : ミニ分光器, 技術資料
- 40) Fred E. Nicodemus: Self-study manual on optical radiation measurements, *Chapters 7, NBS technical note* 910-4 (1979).
- 41) Y. Zong, S. W. Brown, B. C. Johnson, K. R. Lykke and Y. Ohno: Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers, *App. Opt.*, 45, 6 (2006) 1111-1119.
- 42) S. Nevas, G. Wübbeler, A. Sperling, C. Elster and A. Teuber: Simultaneous correction of bandpass and stray-light effects in array spectroradiometer data, *Metrologia*, 49, 2 (2012) S43-S47.
- 43) R. D. Saunders and J. B. Shumaker: Apparatus func-

- tion of a prism-grating double monochromator, *App. Opt.*, 25, 20 (1986) 3710-3714.
- 44) I. Vayshenker, S. Yang, X. Li, T. R. Scott, C. L. Cromer: Optical fiber power meter nonlinearity calibrations at NIST, NIST Special Publication 250-56 (2000).
- 45) K. D. Mielenz and K. L. Eckerle: Spectrophotometer Linearity Testing Using the Double-Aperture Method, *Appl. Opt.*, 11, 10 (1972) 2294-2303.
- 46) S. Nevas, A. Teuber, A. Sperling and M. Lindemann: Stability of array spectroradiometers and their suitability for absolute calibrations, *Metrologia*, 49, 2 (2012) S48-S52.
- 47) S. G. R. Salim, N. P. Fox, E. Theocharous, T. Sun and K. T. V. Grattan: Temperature and nonlinearity correction for a photodiode array spectrometer used in the field, *Appl. Opt.*, 50, 6 (2011) 866-875.
- 48) 米国エネルギー省 Web ページ, CALiPER Exploratory Studies: <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/exploratory.html>
- 49) H. Preston-Thomas: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 27, 1 (1990) 3-10.