

黒体放射に基づく分光放射照度標準の実現に関する調査研究

岩佐祐希*

(2021年1月31日受理)

**A survey on realization of spectral irradiation standard
by using high temperature blackbody radiation**

IWASA Yuki

Abstract

The most fundamental and important quantity in optical radiometry is spectral irradiance, which is the irradiance per unit wavelength, where irradiance is defined as the density of radiant power with respect to area at a point on the irradiated surface. Spectral irradiance is widely used to characterize source properties, to calibrate optical measurement devices and to quantitatively evaluate optical phenomena on the irradiating surface. The primary standard of the spectral irradiance is generally realized by means of a blackbody radiator according to the Planck's law. This paper surveys the measurement techniques, implemented in world-leading national metrology institutes including National Metrology Institute of Japan (NMIJ), to realize the spectral irradiance based on the blackbody radiator and their uncertainty evaluation. There are two major approaches to determine blackbody temperature, using an absolute radiometer traceable to the electric standard, and a fixed-point blackbody radiation traceable to the temperature standard. By reviewing technical progress and key issues in each approach, the future direction to improve the uncertainty of spectral irradiance scale in NMIJ is also discussed, especially by focusing on the uncertainty due to temperature determination of the blackbody radiator.

1. はじめに

1.1 測光・放射測定

紫外、可視、近赤外の波長域（本調査研究では波長200 nm から 2500 nm）を中心に、光放射の応用は民生、産業を含め多岐にわたる。今日では当たり前のように我々の生活の一部となっている照明をはじめ、ディスプレイ製品やプロジェクターなど生活に身近な可視域での応用ばかりでなく、紫外域や近赤外域では分光分析、光化学・光生物学、光通信、医療応用、リモートセンシングなど幅広い分野で利用されている。また、今世紀に入り、LED（Light Emitting Diode）や半導体レーザーなどの固体光源が実用レベルまで普及したことや、スマート

フォンの普及により一人一台ディスプレイを持ち歩くようになり、光放射の用途は多様化の一途をたどっている。このような多様な波長、強度、幾何形状が応用される中で、光放射の計測の信頼性を支える測光・放射標準の重要性はますます増大している。

測光・放射測定の最も基本となる物理量は、単位時間当たりの放射エネルギー（波動の振幅、光子の数）を示す放射束（単位は W）であり、これに対応する測光量は光束（単位は lm）である。一方で、光放射を実際に計測する際には有限のサイズの光源を任意の受光面をもつ計測器を用いて、任意の距離の位置で計測することになる。このため、測光・放射測定においては、検出対象の面積や立体角といった幾何学条件をもとに組み立てられた測定量を考えることが重要となる。

単位立体角あたりの放射束は放射強度と呼ばれる。放

* 物理計測標準研究部門光放射標準研究グループ

射強度は主に点光源とみなせるような光源からの放射束を考えるときに用いられ、単位は $W sr^{-1}$ である。対応する測光量は光度であり単位は cd である。一方で、ディスプレイなどの面光源のように有限の面積から放射される光源を考える際には、光源上の微小面積から放射された放射強度の面積密度である、放射輝度が用いられる。放射輝度の単位は $W sr^{-1} m^{-2}$ であり、対応する測光量である輝度の単位は $cd m^{-2}$ である。また、受光面上の放射束を考える際には、ある面要素に入射する微小面積あたりの放射束である、放射照度としてあらわされる。反対に、ある面要素から発散される放射束は放射発散度と定義され、放射照度と同じ次元をもつ。放射照度と放射発散度はいずれも単位 $W m^{-2}$ であらわされ、これに対応する測光量である照度の単位は lx 、光束発散度の単位

は $lm m^{-2}$ である。Fig. 1 に代表的な光放射に関する測定量の概念図を、Table 1 に各測定量の単位を示す。

1.2 分光放射測定

レーザーのような単色性の高い光源を除き、電球やLEDに代表されるインコヒーレント光源の多くは単色性に乏しく、連続したスペクトルをもつので波長の関数として扱う必要がある。このような場合、放射量を波長 λ で微分した量を分光放射量といい、例えば、放射束 Φ_e と分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ の間には次のような関係が成立する^{1),2)}。

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

$$\frac{d\Phi_e}{d\lambda} = \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \tag{1}$$

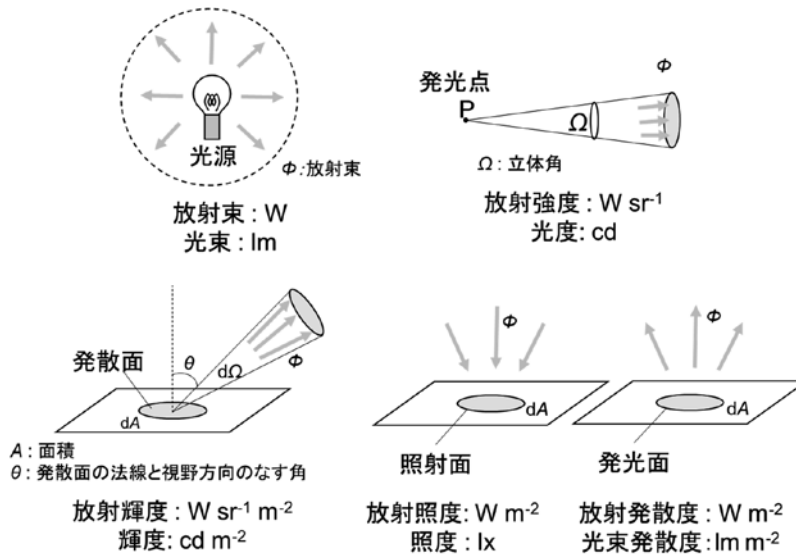


Fig. 1 代表的な放射量と測光量のイメージ

Table 1 放射量と測光量の単位

記号	放射量		記号	測光量	
	量	単位		量	単位
Φ_e	放射束	W	Φ_v	光束	lm
I_e	放射強度	$W sr^{-1}$	I_v	光度	cd
L_e	放射輝度	$W sr^{-1} m^{-2}$	L_v	輝度	$cd m^{-2}$
E_e	放射照度	$W m^{-2}$	E_v	照度	lx
M_e	放射発散度		M_v	光束発散度	$lm m^{-2}$

放射量を分光して分光放射量を求めることを分光放射測定と呼び、分光放射測定の結果として得られた波長ごとのエネルギーの分布を分光分布と呼ぶ³⁾。放射の光学的な性質や物質との相互作用は波長によって大きく性質が異なる。光学的な性質としては、回折特性や散乱特性などが挙げられ、回折格子を用いた分光や散乱体の粒形と波長によって散乱特性が変化する現象などが知られている。また、光と物質の相互作用を考えた場合には、紫外放射は絶縁体や半導体の電子励起を起こすエネルギーをもつ。可視光は紫外放射ほど大きなエネルギーはもたないが、生体細胞などを刺激することが可能である。赤外放射は、分子振動に対応するエネルギーに相当する。

分光放射測定が必要な例として、作用関数に基づき光化学的または光生物学的な作用量を測定する場合を考える。紫外放射は光子エネルギーが強いことから消毒や殺菌に用いられるが、その一方で、人体への影響も考慮する必要がある。Fig. 2 (a) に国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) のガイドライン⁴⁾ で勧告されている紫外放射に対する人体 (目および皮膚) への影響度合いの波長特性をあらわした重みづけ関数 $S(\lambda)$ を示す。この関数はピークである 270 nm で規格化されており、各波長における影響の重みづけを行う。この関数と照射する紫外放射の分光放射照度との積を波長積分することで、実効的な放射照度 E_{eff} を計算することができる。 E_{eff} は重みづけ関数 $S(\lambda)$ 、分光放射照度 $E(\lambda)$ を用いて次のようにあらわすことができる。

$$E_{\text{eff}} = \int_{180}^{400} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ICNIRP では、この実効的な放射照度と照射時間から計算される照射量が 30 J m^{-2} 以下となるように照射限度

を定めている。

Fig. 2 (b) のように異なる分光分布をもつ光源 (i) から (iii) を用いて照射を行う際に、分光分布の影響を考えずに、広い波長域に分光応答度 $R(\lambda)$ をもつ放射照度計で測定した放射照度値から紫外放射による人体への影響量を見積もった場合を考える。放射照度計で測定されるのは受光器に入射した分光放射束と分光応答度の積を波長積分した量である。このとき、仮に放射照度計の表示値が同じであったとしても、光源 (ii) のケースでは紫外放射の照射量を過大評価してしまい、対象に対して十分な照射ができないことが考えられる。反対に光源 (iii) のケースでは照射量を過小評価しており、人体への過剰な紫外放射の被ばくによる影響が懸念される。このように波長に依存した情報を測定を通じて正しく得るためには、測定対象となる光源の分光放射量の測定が必要となる。

次に Fig. 2 (a) の作用関数に基づき、ある放射の人体へ作用量を分光放射測定から求める場合を考える。一般的に分光放射測定では分光器やある特定の波長帯域を透過する光学フィルタなどのデバイスを用いる。これらのデバイスを用いた測定で求められるのは、透過特性に応じて定められる、ある波長区間 $\lambda \pm \Delta\lambda$ における分光放射量の積分値である^{1),2)}。分光分布は放射量を波長微分した量であるので、ある特定の波長において、単位波長あたりの放射量を厳密に分光器や光学フィルタで直接取り出して測定することは不可能である。また、分光器と組み合わせて用いる受光器も通常、波長に依存した分光応答特性をもつため、これらのデバイスと受光器を組み合わせた測定のみから測定対象の光源の定量的な分光分布を得ることはできない。一方で、分光放射量が既知の

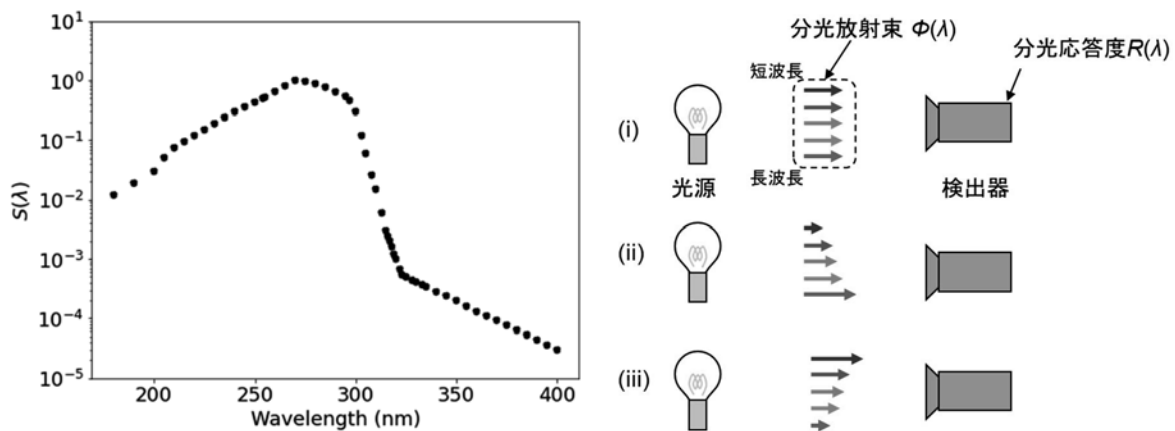


Fig. 2 (a) 人体への相対影響度⁴⁾の重みづけ関数、および (b) 様々なスペクトルをもつ光源に対する測定イメージ図

光源があり、測定対象の光源を同一の幾何条件および波長条件で分光器などを用いて比較測定することができれば、測定対象の光源の分光放射量 $E_0(\lambda)$ が求められる。(比較測定に基づく分光放射量の測定は2.4.1に示す。)この分光放射量と作用関数 $w_0(\lambda)$ による重み付き加算(区分求積)をすることで、作用量 W_0 は次の式で求められる。

$$W_0 = \sum_{k=0}^n w_0(\lambda_k) E_0(\lambda_k) \Delta\lambda_k \quad (3)$$

また、同様に分光放射量と作用関数を用いて関係づけられる量として測光量が挙げられる。測光量は、人間の感じる明るさを加味した心理物理量で、国際単位系(SI)の中でも独特な位置付けである。測光量は、放射量をもとに、人間の視覚の代表的な応答特性で重み付けを行うことで導かれる量である。ここで用いられる応答特性の代表例としては、CIE(Commission internationale de l'éclairage: 国際照明委員会)によって可視光領域の360 nmから830 nmまでの範囲で定められた分光視感効率 $V(\lambda)$ が挙げられる。Fig. 3に示すように、 $V(\lambda)$ は $\lambda_m = 555$ nmの波長において最大値を1とし、その他の波長はこの値に対する相対的な視感効率を示す。光度の単位 cd(カンデラ)はSIの基本単位の一つであり、周波数540 THzの単色放射(空气中で $\lambda_{cd} = 555.017$ nmに相当)の視感効果度を $K_{cd} = 683$ cd sr W^{-1} (単位は $lm W^{-1}$ に等しい)と定めている。この定義に基づき、測光量である光度 I_v は、分光放射量である分光放射強度 $I_{e,\lambda}(\lambda)$ 、視感効果度 K_{cd} 、分光視感効率 $V(\lambda)$ を用いて次式のようにあらわされる。

$$I_v = K_{cd} \frac{V(\lambda_m)}{V(\lambda_{cd})} \int_{360}^{830} V(\lambda) I_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

このように、分光放射量は測光量の概念を考える上でも重要な意味をもっている。

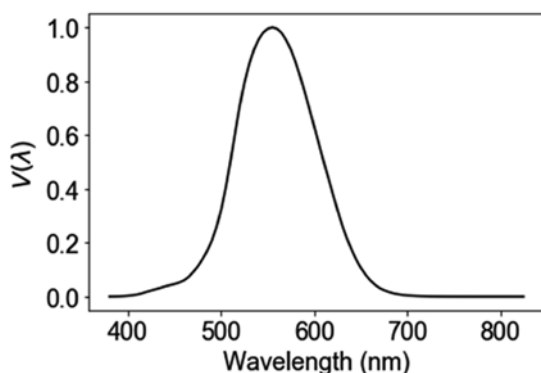


Fig. 3 分光視感効率 $V(\lambda)$

以上をまとめると、何らかの光源に対して分光放射測定を行おうとする場合、一般的な測定手法として最も信頼性が高く、かつ効率的な方法は、分光放射量(相対値であらわす場合には、一般に分光分布と称する)が既知の光源を用意し、同一幾何条件および波長条件の比較測定によって所望の分光放射量を求めることである。比較測定の基準となる分光放射量は、確固たる技術的根拠に基づき物理的に決定された量であることが前提となる。このような分光放射量の基準となるのが分光放射照度標準である。

1.3 分光放射照度標準の利活用

1.3.1 研究・産業分野での応用

分光放射照度標準は、産業分野において、照明製品に対する分光データの取得のほか、一般的な分光放射測定を用いる分光放射計などの計測器の校正用途に広く用いられている。一例として、気象観測における分光放射計の校正について述べる⁵⁾。太陽放射を計測するために主に用いられる分光放射計はマルチチャンネル型の検出器系を有し、温度係数や角度応答特性などに波長依存性がみられるほか、迷光や露光時間の際の影響などへの考慮が必要である。そこで、分光放射量が既知の標準電球を様々な条件で測定することで、温度や角度などの環境要因に由来する応答特性を補正し、信頼性の高い分光放射測定を実現している。このほか、太陽電池の性能評価のためのソーラシミュレータ等の測定⁶⁾や、人工衛星に搭載されたりリモートセンシング機器の校正⁷⁾など、幅広い波長域での信頼性の高いスペクトル計測が求められる分野において、分光放射照度標準の利用は必要不可欠であり、標準供給に対するニーズが非常に高い。

1.3.2 測光・放射標準の組み立てにおける利用

分光放射照度標準は上位標準として測光・放射標準の組み立てにも用いられている。ここでは代表的な事例を2つ紹介する。

分布温度は、測定対象となる光源の分光分布を黒体放射で近似した際の対応する黒体の温度を示す量である。分布温度の決定は、JIS Z 8725-1999「光源の分布温度及び色温度・相関色温度の測定方法」に記載されている方法に準拠しており、測定対象光源の相対分光分布 $S(\lambda)$ を、400 nmから750 nmまでの波長範囲において測定し、得られた相対分光分布から、

$$\sum_i \left[1 - \frac{S(\lambda_i)}{k_{TD} S_b(\lambda_i, T)} \right]^2 \quad (5)$$

を最小にする k_{TD} と T を求める。ここで k_{TD} は係数、

$S_b(\lambda, T)$ は温度 T のときの黒体放射の相対分光分布である。計算に用いるためのデータ点が多い方が精度のよいフィッティングが期待できるが、ある程度以上に波長間隔を細分化しても全体の不確かさには影響を与えないため、国家標準の校正では 5 nm、一般には 10 nm 間隔でのデータが用いられる。測定では相対分光分布が得られるため、計算で求めた黒体放射との比較のために、規格化を行うための係数 k_{TD} を導入している。分布温度の測定においては、相対分光分布を高精度に測定することが重要であり、測定に用いる分光放射計は、分光放射照度標準で値付けを行った電球を同じ条件で測定することによって校正される。言い換えると、分布温度標準は、当該波長域における分光放射照度標準が用いられる。

全光束標準は光源から放出される光束を測定するための標準で、配光測定装置や積分球内に光源を設置して測定が行われる。光束の測定では、多くの場合 $V(\lambda)$ 受光器と呼ばれる測光用の検出器を用いて、放射束を光束に変換して計測している。一方で、LED など多様な分光分布をもつ光源の測定の需要が近年高まっている。これらの光源は従来型の白熱電球などに比べて複雑な分光分布を有しているため、 $V(\lambda)$ 受光器の分光特性の不完全性を考慮すると、 $V(\lambda)$ 受光器を用いた測定は適当ではない。このような光源に対応するため、 $V(\lambda)$ 受光器の代わりに分光放射計を用いて分光分布を測定する方式が主流になりつつある。こうした分光放射測定に基づき光源から放出される光束を求めるためには、分光全放射束の測定が必要となる。分光全放射束は、測定対象光源から全空間に発する放射束の分光密度であり、単位は $W\text{ nm}^{-1}$ である。分光全放射束標準を実現するには、分光放射測定に用いる分光放射計の校正が不可欠であり、この目的に分光放射照度が用いられている。分光全放射束は、分光放射照度標準と光度標準を用いて実現される組立量である⁸⁾。

1.4 調査研究の目的

本調査研究では、分光放射照度標準の実現および維持・供給に関する現状および国際的な動向の理解と、更なる高度化に向けた課題の検討を目的としている。本調査研究では、まず理想的な放射源の実現と分光放射測定の方法について調査し、分光放射照度標準の実現手法についてまとめる。次に、我が国の分光放射照度標準の歴史と現状について調査結果をまとめる。さらに他国の主要な国家計量標準機関 (NMI) における分光放射照度標準の実現手法について調査し、我が国との比較を行う。その上で、不確かさ低減のための温度決定手法などにつ

いての技術的課題を検討し、今後の研究展望を議論する。

2. 分光放射照度標準および校正

2.1 分光放射照度標準の実現方法

本調査研究で対象とする紫外・可視・近赤外領域 (おむね波長 200 nm から 2500 nm の範囲) における分光放射照度について、標準を実現するための方法について以下に概説する。

分光放射照度は 1.1 で示したように、ある受光面に到達する放射の分光分布の面積密度をあらわす量であるので、所定の位置での分光放射照度を与える何らかの基準光源を一次標準として設定するか、または測定対象面での分光放射照度を、何らかの受光器を一次標準として直接計測する方法が考えられる。

基準光源を設定する場合、分光放射照度標準として用いる放射源は、(i) 何らかの分光放射量が物理法則に基づき決定できる、(ii) 幅広い範囲の波長領域で放射が得られる、(iii) 急峻なピークをもたない、という条件を満たす必要がある。(i) については、一次標準として使用するためには、分光放射量が精度よく決定できることが求められ、物理法則に代入するパラメータが精度よく計測できることが必要である。(ii) については、本調査研究で対象とする 200 nm から 2500 nm の波長範囲に対して、できるだけ少ない数の放射源で実現されることが望ましい。これは例えばレーザやランプ輝線などの特定の波長点または波長領域のみの放射源では、校正に用いる標準の数が増えることによる作業の煩雑さや、系の最適条件が変化することによる不確かさの増大を招くためである。(iii) については、前述の通り分光放射照度は放射量を波長で微分した量であるので、急峻なピークをもつ放射源を基準とした場合、そのピーク近傍では波長の不確かさに対する分光放射照度の不確かさが増大してしまうためである。

受光器を一次標準とする場合、検出器の特性として、(i) 分光器の装置関数や、分光フィルタの透過特性など、分光された放射が受光器に入射する効率が精度よく決定できる、(ii) 長期的に安定な出力特性をもち、周辺環境の変化に対応する出力変動が小さい、といった条件が求められる。

現在、分光放射照度標準の実現に用いられる一次標準として考えられる方式としては、(a) 黒体放射、(b) シンクロトロン放射、(c) 絶対放射量が測定可能な受光器を用いた測定、が挙げられる。以下、各々の方式の概要

を示す.

(a) の黒体放射とは、理想的な黒体から放射される電磁波である。理想的な黒体は、あらゆる波長の放射を吸収する物体のことである。1900年にプランクが提唱した黒体放射式⁹⁾によると理想的な黒体の分光放射輝度 $L_{BB}(\lambda, T)$ は、温度 T と波長 λ の関数として次のようにならわされる。

$$L_{BB}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (6)$$

ここで、 c は光速、 k はボルツマン定数、 h はプランク定数を示す。このように、黒体の温度を決定することで分光放射輝度を物理法則に従って実現することができる。Fig. 4 に様々な温度での黒体放射の分光放射輝度を示す。黒体の温度が高くなるに従って、放射量が増大し、ピーク波長が短波長側へと移っていく。分光放射照度標準では短波長側では 200 nm までの校正が必要であるため、黒体の温度も 3000 K 程度とすることが必要となる。分光放射輝度と、本調査研究で対象としている分光放射照度との関係は後述の幾何条件の変換によって結び付けることができる。

実際には理想的な黒体を実現することは難しく、放射体の放射率 $\epsilon(\lambda)$ を考慮する必要がある。この場合、実用的な分光放射輝度 $L_{BB,eff}(\lambda, T)$ は次式のようにあらわされる。

$$L_{BB,eff}(\lambda, T) = \epsilon(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (7)$$

プランクの放射則を分光放射照度実現に運用するには、理想的な黒体に近づけるため、放射率が 1 に近い物質を用いる必要がある。黒体放射炉を構成する放射体として一般的に用いられる黒鉛は、放射率が 0.7 から 0.9 程度¹⁰⁾ であるが、キャビティ構造を作り、その中での多重反射・吸収によって実効的な放射率を 1 に近づけることができる。実際、分光放射照度標準に用いる高温黒体放射炉はチューブ状の黒鉛でできたキャビティ構造を有しており、このキャビティの実効的な放射率は 0.99 を超える¹¹⁾。

(b) のシンクロトロン放射は、電子蓄積リングにより、光速に近い速度まで加速された電子などの荷電粒子が、磁場（ローレンツ力）によってその軌道を曲げられた際に生じる指向性の高い電磁放射である。これは、加速された電子からの双極子放射が相対論的効果により電子の進行方向に集中する現象であり、放射は軌道の接線方向に指向性をもって放射され、X 線領域から赤外域までの連続した分光分布をもつ。このときの一つの電子から放射される分光放射束 Φ_e は Schwinger の式により、

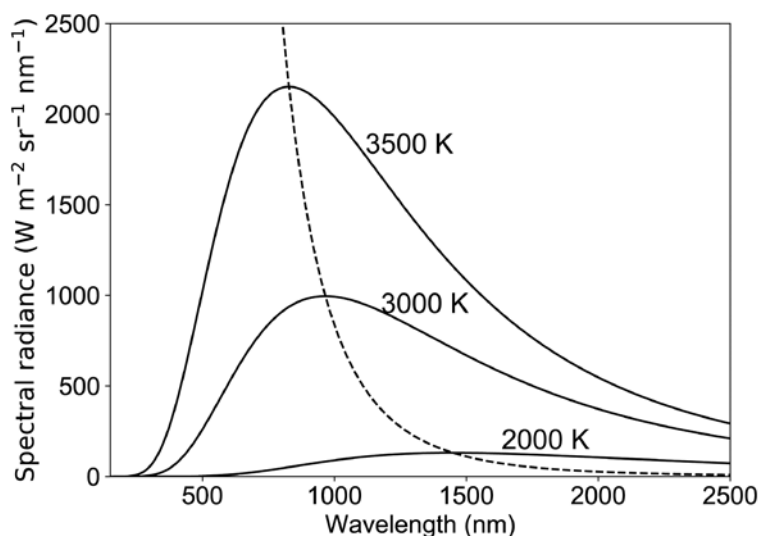


Fig. 4 黒体放射炉の分光放射輝度

$$\Phi_i = 6.83 \times 10^{-31} \frac{\gamma^3}{R^3} G(y)$$

ここで

$$G(y) = y^3 \int_y^\infty K_{\frac{5}{3}}(\eta) d\eta,$$

$$y = \frac{\lambda_c}{\lambda},$$

$$\lambda_c = \frac{4\pi}{3} \frac{R}{\gamma^3},$$

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} \quad (8)$$

とあらわされる。ここで、 λ は波長、 E は電子エネルギー、 R は電子の軌道半径、 m_0 は電子の静止質量、 c は光速、 K はベッセル関数、 γ はローレンツ因子、 λ_c は臨界波長である。式(8)に基づき、電子の軌道半径と電子エネルギーを決定することで、分光放射照度を得ることができる^{12),13)}ので、シンクロトロン放射を基準放射源とした組み立てにより、分光放射照度標準を実現することができる。シンクロトロン放射は特に短波長領域で、黒体放射に比べて強度が強いため、基準放射源として有用である。一方で、1) 電子加速器や電子蓄積リングなどの大型施設が必要となること、2) シンクロトロン放射は角度方向に対して偏光依存性が強く超高真空下での計測が必要であることから、標準電球などの仲介用標準光源との分光器を介した分光放射照度としての比較が難しいこと、3) 電子蓄積リングで用いる電子エネルギーの関係から、近赤外域などの長波長域での測定には不向きであること、4) 電子数測定の精度が不十分であること³⁾などから、分光放射照度標準の一次標準としての適用は主流とはなっていない。一方で、真空紫外から紫外の波長域においては、数カ国のNMIにおいて分光放射照度標準の放射源としての研究が行われている¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。

(c)の方式では、計測器の装置関数を精密に測定し、絶対放射測定が可能な受光器を作成することで、分光放射照度を測定する。これは言い換えると、受光器の構成要素となる検出素子の分光応答度、波長帯域を選別するための光学フィルタや分光器などの分光素子の分光透過率、アパーチャ等の受光器の幾何学的条件を規定するパラメータの校正などを加味して、各波長の分光放射照度に対する応答度を導くことにより、光放射を入射した際の受光器からの出力応答から、その受光器の基準面における分光放射照度を絶対測定する手法である。しかし、一般に光学フィルタや分光器で選別できるのは、ある特定の波長帯域での分光放射量に限られる。分光放射照度測定を行う全ての波長点において装置関数の絶対値を求

めることは現実的ではなく、広帯域の分光放射照度測定を実現した例は今のところ報告されていない。一方、特定の波長に対する測定に限れば、この手法は有用であり、その特定波長の黒体放射の分光放射量を検出器にトレーサブルな方法で測定することで、絶対的な分光放射照度を求めることが可能となる。また、この手法を準用した絶対放射計が開発され、黒体放射炉の温度を決定するために用いられている。この手法については後述する。

以上の対比から、現在の分光放射照度標準の実現では、ほとんどの場合、プランクの放射則に基づき、黒体放射を一次標準として用いている。以降、本調査研究では、黒体放射に基づく分光放射照度標準について述べる。

2.2 黒体放射に基づく分光放射照度標準

2.2.1 黒体放射炉の温度決定

式(7)に基づきプランクの放射則を用いて分光放射照度標準を実現する場合、計測によって求めるべきパラメータは黒体放射炉の温度 T および放射率 $\epsilon(\lambda)$ である。特に黒体の温度決定は分光放射照度標準の不確かさに大きく影響するため、正確な温度測定が重要となる。キャビティ構造を有した黒体放射炉の場合、その放射率の1からの外れは多くの場合0.005以下と小さく、またキャビティ構造の形状等に応じた放射率の計算手法が確立しているため、放射率の決定に起因する不確かさは、温度決定に係る不確かさと比べて無視できる程度に小さい。

3000 K前後の高温域における温度の決定は、放射温度計測によって行われる。放射温度計測は、測定に用いる波長帯域によって単色、多色、全放射計測の種類に分類することができる。単色放射温度計の模式図をFig. 5に示す。単色放射温度計は測定対象となる放射源からの放射をレンズで集光し、分光フィルタを通ったある波長帯域の放射を検出器で計測する。

単色温度計での測定では、対象物質の放射率を計算に入れる必要がある。また、高温域を測定する際は一般に600 nmから900 nm程度の波長を用い、検出器にはSiフォトダイオードなどの半導体検出器を用いる。測定対象の温度が1500 K以下の場合はより長い波長が測定に用いられ、検出器もInGaAsフォトダイオードや熱型検出器等が用いられる。単色放射温度計の出力と黒体放射炉の温度の関係は次の式を用いてあらわされる¹⁷⁾。

$$V(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (9)$$

ここで $V(T)$ は単色放射温度計の出力、 T は黒体放射炉の温度、 A 、 B 、 C は放射温度計に固有の係数、 $c_2 = 0.014388 \text{ m}\cdot\text{K}$ は放射の第二定数である。係数 A 、 B 、 C

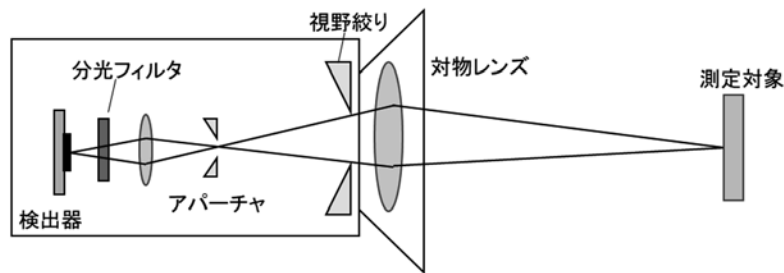


Fig. 5 一般的な放射温度計の模式図

は、後述の温度定点を用いた校正によって決定される。この式 (9) を用いることで、出力電圧から温度を決定することができる^{17), 18)}。

二色 (多色) 温度計は同様の測定を 2 種類の波長帯域で行い、各波長帯域での測定強度比から温度を導き出す。この手法では、測定対象物質の放射率が波長帯域間で同じであれば、放射率を考慮せずに温度を求められることが特徴である。さらに、光学フィルタ等による分光を行わずに、測定対象からの全放射を測定し、その放射エネルギーから温度を求める全放射測定も用いられる。前述の通り、分光放射照度標準に用いる黒体は実効的な放射率がほぼ 1 に近く、放射率による不確かさは小さいため、単色放射温度計に基づく温度決定方法が広く使用されている。

放射温度計の校正に用いる温度定点は 1990 年以降、ITS-90 (International Temperature Scale of 1990)¹⁹⁾ に定められている定点が使用されてきた。国際的な協約で定められている国際温度目盛りである ITS-90 は、複数の温度定点を定義定点とし、その温度値を不確かさのない定義値として与えている。ITS-90 で定められている温度定点の最高温度は銅の凝固点 (1357.77 K) である。ITS-90 の施行後、より高い温度の温度定点の実現に向けた研究が展開され、その中で絶対放射温度計による熱力学温度の決定手法が確立された^{20), 21)}。絶対放射温度計は Fig. 6 に示すように、受光器と光学フィルタ、精密アパーチャ (放射輝度測定の場合はレンズ等の結像光学系を含む) の組み合わせで構成される。受光器は温度による出力変動を避けるため、温度制御がなされたハウジングに入れられる。光学フィルタは誘電体多層膜によるものが一般的に用いられる。精密アパーチャの開口面積は精密ステージを用いてエッジを検出する方法などにより求められる²²⁾⁻²⁴⁾。絶対放射温度計は極低温放射計にトレーサブルなトラップ型検出器との比較測定によって、測定対象波長域における分光応答度 (A/W) が高精度に測定されている。このように、構成する光学素子等の特性を評

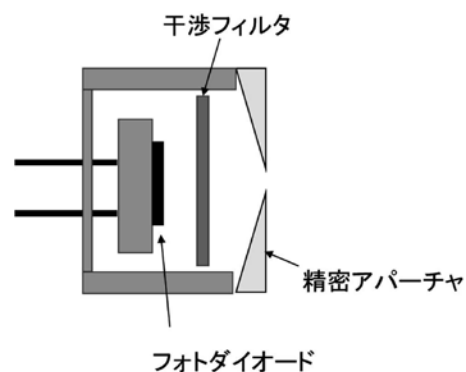


Fig. 6 絶対放射温度計の模式図

価することにより、ある波長帯域における黒体放射の放射照度 (レンズ等を伴う場合は放射輝度) の絶対値を求める測定が可能となる。このようにして得られた絶対放射温度計を用いて黒体放射炉からの放射を測定し、得られた放射量の値から、プランクの放射則に基づき黒体放射炉の温度を測定することができる。現在では、絶対放射測定によって測定された熱力学温度の不確かさは高温域においては国際温度目盛りを上回る精度で測定可能となっている。このような高温域では金属-炭素系高温定点群²⁵⁾の開発が進み、絶対放射測定によって温度値の決定が行われた^{26), 27)}。これにより ITS-90 での定義定点よりも高い温度域での直接的な熱力学温度が定点黒体放射炉によって実現可能となり、Re-C の共晶点 (2747.84 K) や WC-C の包晶点 (3020.6 K) の熱力学温度が報告されている^{28), 29)}。

2.2.2 幾何条件の変換 (放射輝度-放射照度変換)

黒体放射炉の温度を決定することによってプランクの放射則から得られるのは、黒体放射炉の分光放射輝度である。黒体放射炉の分光放射輝度の値を用いて、同じ黒体放射炉によって照射された、ある受光面における分光放射照度の値を求めるためには、幾何条件の変換 (一般に放射輝度-放射照度変換と称する) を行う必要があ

る。Fig. 7 (a) のように2つの有限な面積をもつ平面を完全拡散面と仮定したとき、平面1から平面2への立体角投射率 (Configuration factor) F_{12} は次のように書ける³⁰⁾。

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi d^2} dA_1 dA_2 \quad (10)$$

ここで、 A_1 、 A_2 はそれぞれ平面1、平面2の面積、 θ_1 、 θ_2 は平面1の中心と平面2の中心を通る直線が平面の法線となす角、 d は2平面の中心距離である。一般的にこの積分を計算することは困難である。

幾何条件を Fig. 7 (b) のようなシンプルな系とした場合の放射の伝達効率は、理論的に計算することができる。Fig. 7 (b) では、同軸上の点を中心とし、軸に垂直に置かれた2枚の円形のアパーチャを考えている。この場合、幾何条件によって決定する幾何学的因子 (geometrical factor) g は、 F_{12} およびアパーチャ1の面積 A_1 を用いて次の式のように計算できる³¹⁾。

$$g = F_{12} A_1 = \frac{2\pi r_1^2 r_2^2}{(r_1^2 + r_2^2 + d^2) + \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 + d^2)^2 - 4r_1^2 r_2^2}} \quad (11)$$

ここで r_1 、 r_2 はそれぞれアパーチャ1、2の半径、 d は二

枚のアパーチャ間の距離である。これにより、アパーチャ1からアパーチャ2へと伝達される放射束 $\Phi_{12}(\lambda)$ は、アパーチャ1の開口面を放射源とみなし、その分光放射輝度 $L_{BB}(\lambda)$ を用いて、

$$\Phi_{12}(\lambda) = g\pi L_{BB}(\lambda) \quad (12)$$

とあらわすことができる。結局、アパーチャ2の開口面上の分光放射照度 $E(\lambda)$ は、アパーチャ2の面積 A_2 を用いて、

$$E(\lambda) = \frac{\Phi_{12}(\lambda)}{A_2} = \frac{g\pi L_{BB}(\lambda)}{A_2} \quad (13)$$

となる。

2.3 分光放射照度標準の実現および維持に用いる標準器

2.3.1 高温黒体放射炉

Fig. 8 に高温黒体放射炉の内部構造を示す。多くの場合、高温黒体放射炉の炉心には黒鉛が用いられ、放射測定用の開口を有したアスペクト比の高い形状のキャビティと、その周囲に熱を断熱するためのヒートシールドが設けられている。比較的低温 (1300 K 前後) までの加熱を行う黒体放射炉では周囲のヒーターから間接的に加熱を行うが、高温 (3000 K 前後) まで加熱する黒体

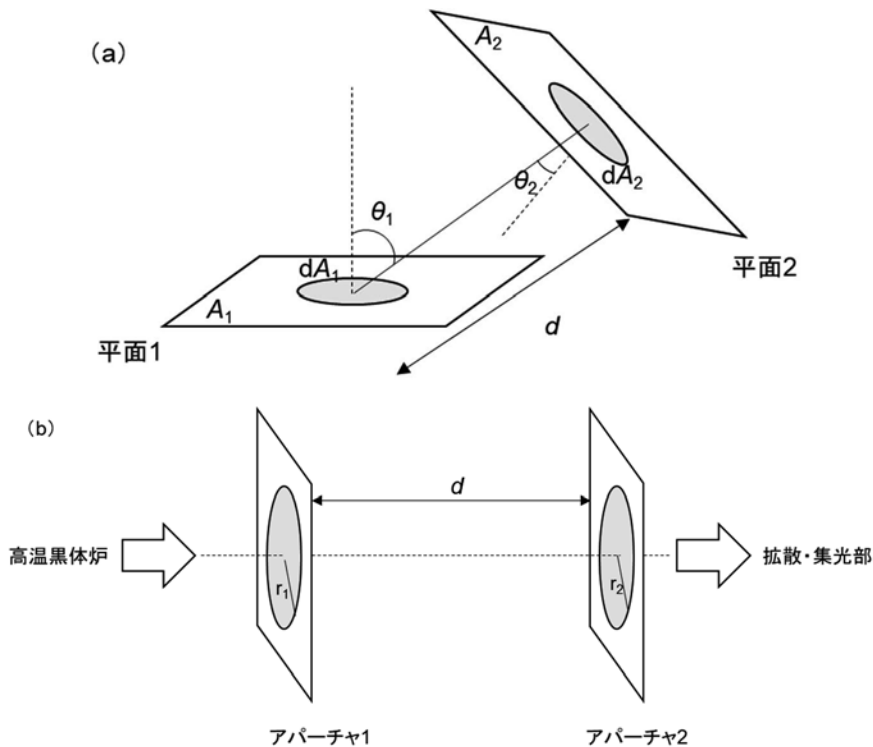


Fig. 7 (a) 2枚の平面間の放射伝達 (b) 同軸上に置かれた2枚のアパーチャ間の放射伝達

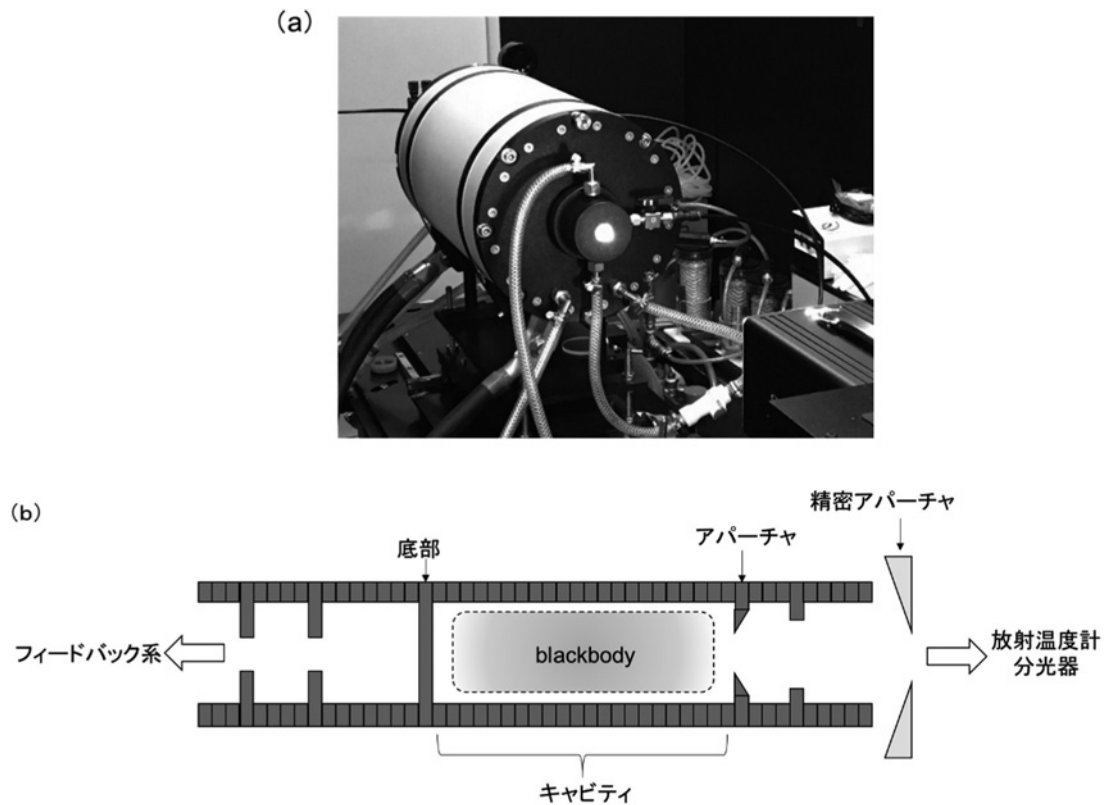


Fig. 8 (a) 高温黒体放射炉の外観, および (b) 黒鉛炉心のキャビティ構造 (円筒) の中心軸を通る平面での断面図

放射炉では、炉心の黒鉛に直接通電し、ジュール熱によって加熱を行う。この際の電流は加熱に必要な消費電力を賄うため数 100 A 以上にもなる。黒鉛は 600 K 以上の温度で酸素と反応するため、加熱中はアルゴンなどの不活性ガスをパージしながら使用する。

一般的な黒鉛は 2000 K 以上で蒸気圧が急激に増大し、昇華による消耗が激しくなる³²⁾。このため、典型的な黒鉛を用いた高温黒体放射炉では、3000 K 前後の温度まで持続的に加熱動作させた際の炉心の寿命が短いことが問題となっていた。この問題を解決するため、1990 年ごろから、高い面内配向性を有した熱分解黒鉛 (Pyrolytic graphite) を炉心に用いた高温黒体放射炉が提案され、高温動作時の安定性と炉心の寿命の改善、および更なる高温化の試みが行われてきた³³⁾⁻³⁵⁾。現在では、多くの NMI において熱分解黒鉛を炉心にもつ高温黒体放射炉が、分光放射照度標準を実現するための基準放射源として用いられている。Fig. 8 (b) に熱分解黒鉛でできた炉心の模式図を示す。炉心はリング状の熱分解黒鉛を積み重ねてきた円筒形状をしており、円筒の中間付近に底部となる円板上の黒鉛が 1 枚挟み込まれている。キャビティから放射された光は精密アパーチャを通り、分光器

へと照射される。また、開口部と反対側にも放射を観測する機構が取り付けられ、黒体放射炉のフィードバックなどに用いられる。

分光放射照度標準では紫外域から近赤外域にかけて、多数の波長点での測定が求められる。一般に分光放射照度測定では、分光器 (分光放射計) を介した測定が行われ、所定の波長に設定した上で、当該波長点を中心とした微小な波長帯域を通過する放射に対応した検出器出力の測定を行い、順次波長を切り替える (ステップ測定) 方式をとるため、全波長域を測定するためには、1 時間から 2 時間程度の時間を要する。この間の高温黒体放射炉の温度変動は黒体の温度決定精度に大きく影響し、分光放射照度標準の不確かさの要因の一つとなる。このため、高温黒体放射炉に取り付けられたモニタ用の放射温度計によって、常時、黒体放射炉の温度変動を観測し、必要に応じてフィードバック制御が行われる。また、炉心には数 100 A の電気が流されているため、筐体などの非電極部との放電などが生じると、電流制御が不安定になり、温度変動の一因となる。

2.3.2 定点黒体放射炉

定点黒体放射炉は、炉心である黒鉛のつぼの内部に金属などを封入したものである。黒鉛のつぼは放射率を1に近づけるため、2.3.1と同様にキャビティ構造をもち、放射を取り出すための開口をもつ。封入した金属の凝固点や、金属と炭素との共晶点または包晶点など、物質が相変化する際に発現する、温度が一定の値を保持する状態（温度プラトー）を利用することで、黒体を特定の温度に一定時間保つことができる。ITS-90ではいくつかの金属の凝固点温度が定義定点として定められており、定点黒体放射炉はこれらの定義定点の温度での黒体放射を実現するものである。また、その後の研究開発により、3000 K付近までの温度定点が報告されている。定点黒体放射炉を使用する際は、まず、加熱によって内部の金属を融解させる。このとき、黒体放射炉の温度は融解温度で一定になる。融解が終わり、温度が再び上昇したのち、加熱を止めて徐々に温度を下げると、黒体放射炉の温度は過冷却を経て、凝固点温度でプラトー状態に入る。プラトーの持続時間は黒鉛のつぼの種類や封入した金属によって変わるが、10分から20分程度であるので、放射温度計の校正などの必要な測定はこの時間内に行うことが求められる。

2.3.3 仲介用標準光源

高温黒体放射炉からの放射は、動作条件によって変化するため都度2.2で示した原理に基づき、その温度を決定する必要がある。また、黒体放射炉の温度決定や安定動作に必要な手順は非常に複雑な上、長時間の高温動作による炉心の消耗による特性変化などの影響も懸念される。このため、高温黒体放射炉は、分光放射照度標準の実現に不可欠であるが、標準値自体を維持する目的には必ずしも適していない。一般には高温黒体放射炉を定常的な分光放射照度の校正に直接用いるのではなく、高温黒体放射炉から導かれる分光放射照度標準値を適切な仲介用標準光源に比較測定によって値を移しておき、通常の光源の校正にはこの仲介用標準光源を用いる。仲介用標準光源はその安定性、分光分布、配光特性などの各特性を加味し、使用用途に合わせて選択される。測光標準では特別な仕様により製造・選別された白熱電球を仲介用標準光源として用いているが、分光放射照度においては、紫外域の測定をカバーする必要性から、より分布温度の高い点灯条件が可能であるハロゲン電球に基づく標準電球が用いられている。これらの標準電球は、通常2個または3個の電球群として管理され、各々の値の平均値を用いることで電球由来の不確かさを低減する取組

みがなされている。また、一般的に黒体放射から値付けを行った標準電球群の下に、標準電球群との比較測定によって値付けされたワーキングスタンダード電球（常用標準電球）群が設けられ、通常の校正業務に際しての校正基準として用いられる。

一般的な白熱電球は、アルゴン雰囲気中に封止されたタングステンフィラメントに電流を流すことで、加熱されたフィラメントからの放射を得る。この方式では使用とともにタングステンフィラメントが消耗するため、フィラメント温度の上限を高く設定することができない。封止する雰囲気中に臭素などのハロゲンガスを微量混入させたハロゲン電球では、フィラメントから揮発したタングステン蒸気がハロゲンとの反応を経てフィラメントに再蒸着されるハロゲンサイクルの寄与によって、フィラメント温度を通常よりも高く設定できる。Fig. 9に分光放射照度の仲介用標準光源として用いられているハロゲン電球（以下、分光放射照度標準電球）の一例を示す。分光放射照度標準電球は、500 Wから1000 W程度の入力定格をもち、一定の電圧または電流条件で点灯制御して用いられる。分光放射照度の測定においては、光源から所定の位置に到達する分光放射束の面積密度を規定する必要があるため、測定点を定めるための距離起点が与えられている。多くの場合、電球のガラスバルブを支持する台座の前面が基準面となっている。ハロゲン電球は、特に使用開始初期において点灯時間とともに光源の特性が変化するため、フィラメントの変化を均一にするため、枯化（エージング）処理が行われる。一般には定格条件で100時間から200時間前後のエージング処理を行い、安定性の高いものを選別することによって、その後の10時間あたりの点灯における分光放射照度の変化率を0.1%程度に抑制することが可能である。また、毎回の測定の際には、出力を安定させるために10分から15分程度の予備点灯を行い、安定化を行った後に測定する。現在、ハロゲン電球に基づく分光放射照度標準電球は、250 nmから2500 nmの波長範囲において分光放射照度の標準値を維持し、比較測定に基づく校正時の基準として用いられている。

一方で、250 nmより短波長域では、ハロゲン電球の出力は微弱で、測定に際して十分なS/Nを確保できず安定性に課題があることなどから、当該波長域で実用的な校正に耐えうる分光放射照度をもち、かつ長期的な点灯安定性や配光特性に優れた光源として、重水素ランプ（Fig. 9）が用いられている。重水素ランプはバルブ内に封入された重水素ガスが陰極から放出した熱電子によって放電し、放射を得る光源である。重水素ランプは

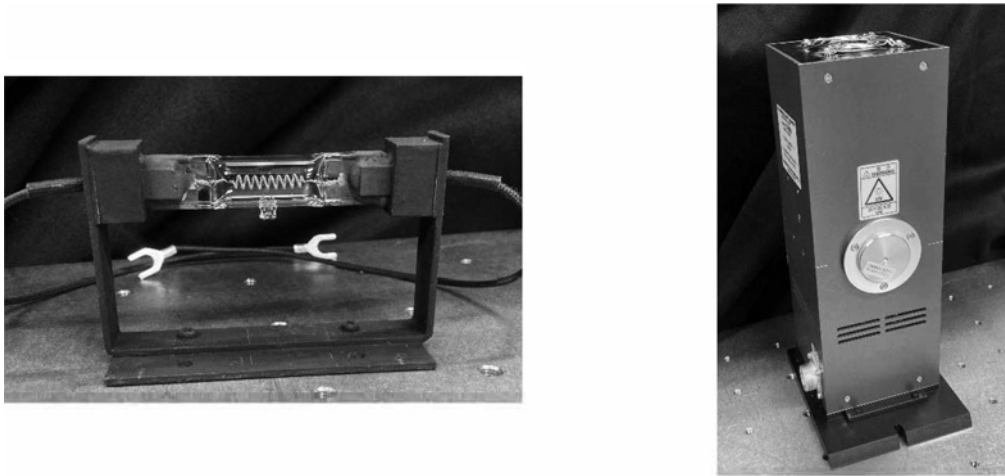


Fig. 9 分光放射照度標準用の仲介用標準光源であるハロゲン電球（左）と重水素ランプ（右）

真空紫外域から紫外域にかけて連続スペクトルをもち、分光光度計などの紫外用光源としても用いられる。現在、重水素ランプは、波長 200 nm から 400 nm の紫外域について分光放射照度の仲介用標準光源として用いられている。専ら紫外域での測定を必要とする用途での使用を念頭に、250 nm から 400 nm の波長域については分光放射照度標準電球と校正範囲がオーバーラップしている。

2.4 測定装置群

2.4.1 分光放射測定の手順

まず、既知の黒体放射を実現するために、高温黒体放射炉を 3000 K 程度に加熱する。次に 2.2.1 に示した原理に基づき放射温度計で高温黒体放射炉の温度を計測し、黒体放射の分光分布を求める。温度変動を確認するため、測定終了後にもう一度、高温黒体放射炉の温度を計測する。そして、2.2.2 に示した原理に基づき、高温黒体放射炉の温度からプランクの放射則に基づき導かれる分光放射輝度値に幾何条件の変換を加味することで、分光放射照度値を算出する。次に、仲介用標準光源を点灯させ、高温黒体放射炉との比較測定により、仲介用標準光源に対して分光放射照度の値付けを行う。この比較測定は、分光器を母体とした分光放射測定用の光学系（分光光学系）を用いて、所定の測定波長点での測定対象に対する受光出力を測定する形で行われる。被校正光源への分光放射照度の値付けも同様に、仲介用標準光源との比較測定によって行われる。

ここで、比較測定の原理について概説する。分光放射測定において、分光放射照度 $E(\lambda)$ を測定する際に、分光器などの一般的な分光光学系を用いた際の設定波長 λ

での出力 $R(\lambda)$ は次のようにあらわされる。

$$R(\lambda) = \int_0^{\infty} \eta(\lambda) s(\lambda) g(\lambda, \lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

ここで、 $\eta(\lambda)$ は分光器内の素子の透過率や反射率などの素子の特性によって決まる捕捉効率、 $s(\lambda)$ は分光光学系に内蔵された受光器の分光応答度、 $g(\lambda, \lambda)$ はスリット関数である。出力 $R(\lambda)$ は、通常、電圧や電流などの量で、この結果から直接分光放射量を求めることはできない。捕捉効率、分光応答度、スリット関数といった各関数を定量的に評価することで分光分布を得ることはできるが、一般的にこの方法で正確な分光分布を決定することは困難である。分光分布を得るためには、既知の分光分布をもつ放射源を測定対象と同じ条件で比較することで、相対的な（または絶対的な）分光分布を得ることを考える。ここで、被校正光源の分光放射照度を $E_t(\lambda)$ 、校正基準となる仲介用標準光源の分光放射照度（既知）を $E_s(\lambda)$ とし、各々を測定したときの受光器からの出力をそれぞれ $R_t(\lambda)$ 、 $R_s(\lambda)$ とすると、 $R_t(\lambda)$ 、 $R_s(\lambda)$ は次のようにあらわされる。

$$R_t(\lambda) = \int_0^{\infty} \eta(\lambda) s(\lambda) g(\lambda, \lambda) E_t(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

$$R_s(\lambda) = \int_0^{\infty} \eta(\lambda) s(\lambda) g(\lambda, \lambda) E_s(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

いま、分光器の設定波長を λ にしたとき、 $\lambda \pm \Delta\lambda$ の区間内だけに出力をもち、その他の範囲では出力が 0 であるようなスリット関数を考える。通常、 $\eta(\lambda)$ と $s(\lambda)$ は波長に対して緩やかな変化をもち、区間 $\lambda \pm \Delta\lambda$ では一定とみなすことができるため、設定波長 λ のみの関数として $H(\lambda) = \eta(\lambda) s(\lambda)$ とかける。測定対象の分光放射照度 $E_t(\lambda)$ が急峻なピークをもたず緩やかな分光分布をもつ

場合、スリット関数 $g(\lambda, A)$ も区間 $A \pm \Delta\lambda$ で一定とみなすことができ、 $G(A) = g(\lambda, A)$ とあらわされる。また、測定対象の $E_t(\lambda)$ と $E_s(\lambda)$ は緩やかな分光分布をもつので、区間 $A \pm \Delta\lambda$ ではそれぞれ $E_t(A)$ 、 $E_s(A)$ とすることができる。ここで出力 $R_t(A)$ と $R_s(A)$ の比を取ると、

$$\frac{R_t(A)}{R_s(A)} = \frac{H(A)G(A)E_t(A)}{H(A)G(A)E_s(A)} = \frac{E_t(A)}{E_s(A)} \quad (17)$$

となる。このような光源の分光放射照度は式 (17) を変形して次のようにあらわすことができる。

$$E_t(A) = \frac{R_t(A)}{R_s(A)} E_s(A) \quad (18)$$

このように、被校正光源の分光放射照度は、装置に由来する関数に関係なく分光光学系に内蔵された受光器からの出力の比と、仲介用標準光源に予め目盛定めされた既知の分光放射照度の値から導くことができる。

Fig. 10 に一般的な分光放射照度標準の実現および校正に用いる装置全体の模式図を示す。分光放射照度標準では参照面に照射された黒体放射炉、または、仲介用光源からの放射による分光放射照度を測定する。分光放射照度測定における参照面は、入射光学系に設置された積分球の入射ポートまたは拡散反射板の表面であり、積分球で平均化された壁面の像、または、拡散反射板上の像を集光ミラーにより分光器の入射スリット上に結像する。分光器によって分光された放射は、分光器の検出光学系に置かれた受光器で測定される。前述の比較測定の原理に基づき、高温黒体放射炉と仲介用標準光源、または仲介用標準光源と被校正光源の比較測定を行い、受光

器の出力比から参照面における分光放射照度の比を求め、分光放射照度標準は 200 nm から 2500 nm という幅広い波長帯域を測定するため、測定波長ごとに合わせて測定条件を最適化する必要がある。以降、各節では測定装置の主な構成要素について述べる。

2.4.2 入射光学系

高温黒体放射炉からの放射は、キャビティからの温度が決定された黒体放射と、キャビティ部以外からの不要放射が混在している。不要放射を参照面の視野から除くため、アパーチャが置かれる。また、このアパーチャは前述の放射輝度-放射照度変換の計算にも用いられるため、内面を精密にナイフエッジ加工されたものを用い、別途開口面積を精密に決定する必要がある。アパーチャは黒体の前面および拡散面の手前に置かれる。この2つのアパーチャの中心は光軸と一致するようにアライメントが必要である。

前述の通り、分光放射照度の標準値は参照面上での値であり、一般的には、参照面に照射された放射の拡散光を分光器に導き比較測定の対象とする。そのため、参照面に到達する放射が均一に拡散されている必要がある。拡散のためには、積分球や拡散反射板が用いられる。積分球は球の内面に拡散材料が塗布された中空の球であり、積分球に入射された放射は球内で多重散乱を繰り返す。球内面の放射照度が均一になるという特徴をもつ。拡散反射板は拡散材料で構成された平板であり、均等拡散面として近似できる。積分球を用いた場合、分光器へ

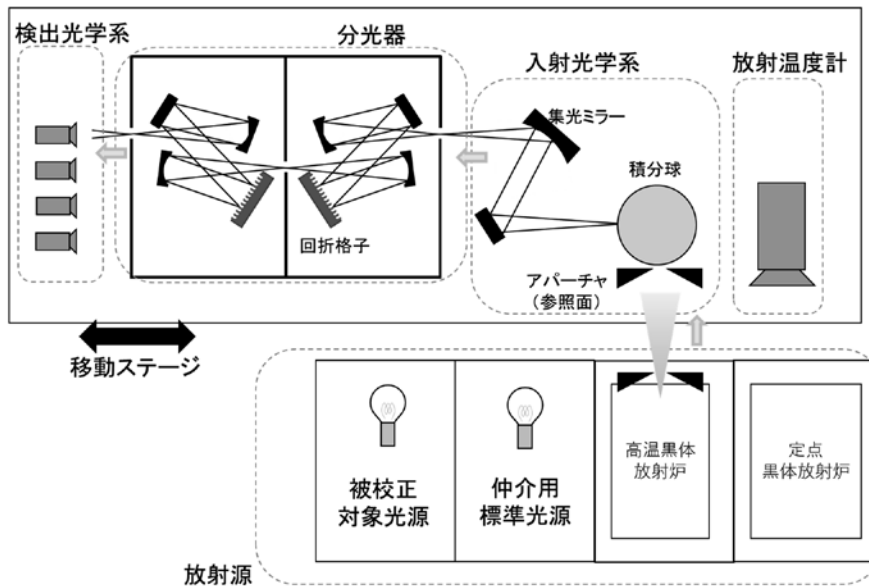


Fig. 10 分光放射照度標準の実現・校正に用いられる装置の模式図

入射する放射はより均一に拡散されるが、放射量は拡散反射板に比べ一桁以上減少する。拡散材料は測定波長域全体で一様な反射特性を有していることが必要であり、四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) を延伸・圧着加工した材料や硫酸バリウム塗装面などが一般的に用いられる。積分球または拡散反射板からの放射は、集光ミラーを介して分光器の入射スリット上に結像される。

2.4.3 分光器

分光放射照度標準では、分光のために回折格子やプリズムなどの波長分散素子を用いた分光器が用いられる。一般的にはツェルニーター型分光器が用いられ、波長分解能や迷光の低減のために分光器を2台対称となるように連結させたダブルモノクロメータを用いることが多い。通常、回折格子は波長領域に合わせて複数個用意されており、波長領域に合わせて選択する。また、回折格子で分光される光には測定対象の波長 λ の一次回折光のほか波長 $\lambda/2$ の2次光、波長 $\lambda/3$ の3次光といった高次光成分も含まれるため、高次光カットフィルタを光路に挿入し、短波長の光をカットする。入射スリットと出射スリットの幅は光源の光量に合わせて調整される。測定の際にはこのような多岐にわたる測定パラメータを測定波長に合わせて制御する必要がある。

2.4.4 検出光学系

分光器によって分光された放射は出射スリットを通して検出光学系へと導かれる。検出光学系では、集光ミラーを介して出射スリットの像を適切な倍率で受光器上に結像する。受光器を構成する検出素子としては、短波長域では主に光電子増倍管が用いられ、光量によって印可電圧を変化させ感度の調整を行う。可視域では主にSiフォトダイオードが用いられ、近赤外域はInGaAsフォトダイオードやPbS検出器、InSb検出器などが用いられる。これらの検出器からの電流出力は、多くの場合、電流-電圧変換を介して直流電圧としてデジタルマルチメータを用いて読み取られる。測定する放射が微弱な場合やPbS検出器などの光導電型素子を使用する場合、入射部にてチョップを用いて周期的な光パルスを生じ、ロックインアンプを用いた交流測定が行われる。

3. NMIJにおける分光放射照度標準

3.1 分光放射照度標準の現状

我が国の分光放射照度標準は、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) にて維持管理されている。

現行の分光放射照度標準は、すでに実現されていた分光放射照度標準の不確かさを改善するために、より高温で動作する黒体放射炉を導入して実現された。これによって3000 K付近の黒体放射を実現することが可能となった³⁶⁾。その成果として、この黒体放射と分光放射照度標準電球を直接比較測定することで、2002年に国内に供給している分光放射照度の標準値の見直しが行われた。高温黒体放射炉の温度決定は、温度標準にトレーサブルな銅の凝固点を利用した定点黒体放射炉を用いている。二つの黒体放射炉の分光放射輝度を、分光放射輝度計を用いて各波長での比較を行い、600 nm から780 nmの波長域での分光放射輝度の比から温度決定を行う³⁷⁾。温度が決定した高温黒体放射炉と分光放射照度標準電球を2.4.1で示した方法で比較測定することで、式(18)によって分光放射照度標準電球の相対分光放射照度値 $\Phi_{\text{BIn}}(\lambda)$ を校正することができる。分光放射照度値は標準電球で維持されている波長 λ_{calib} での値と相対分光放射照度を用いて見直しが行われた。比較校正の出力を $R(\lambda)$ 、分光放射照度標準電球で維持されている λ_{calib} での分光放射照度の絶対値を $E_{e,LT}(\lambda_{\text{calib}})$ 、見直し後の分光放射照度 $E_{e,LT,AMEND}(\lambda)$ は次のように求められる。

$$E_{e,LT,AMEND}(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R(\lambda_{\text{calib}})} \frac{\Phi_{\text{BIn}}(\lambda)}{\Phi_{\text{BIn}}(\lambda_{\text{calib}})} E_{e,LT}(\lambda_{\text{calib}}) \quad (\lambda \neq \lambda_{\text{calib}})$$

$$E_{e,LT,AMEND}(\lambda) = E_{e,LT}(\lambda_{\text{calib}}) \quad (\lambda = \lambda_{\text{calib}}) \quad (19)$$

この時には $\lambda_{\text{calib}} = 500 \text{ nm}$ が適用された。この見直しによって従前特に不確かさの大きかった赤外領域において、不確かさを半分程度まで低減することに成功した。

このようにして改善された分光放射照度標準を用いて、2001年から2005年にかけて行われた基幹比較(CCPR-K1.a)において、全ての波長点において標準値の国際的な同等性が確認された³⁸⁾。250 nm から2500 nmの波長域における分光放射照度標準の値は、仲介用標準光源となるハロゲン電球 (分光放射照度標準電球) に移され、維持されている。

また、高温で動作可能な黒体放射炉を導入したことにより、それまで対応できなかった短波長紫外域において、黒体放射炉と測定対象光源との直接比較を行うことができるようになった。また、産業界からの要請もあり、分光放射照度の波長範囲を200 nmまで拡張する取り組みが行われた。分光放射照度標準電球は、250 nmより短い波長領域での放射がほとんどないため、仲介用標準光源には、200 nmから400 nmの波長域においてブロードな分光分布をもつ重水素ランプが選択された。以下

に、200 nm から 400 nm における分光放射照度標準の実現方法について概説する。

3000 K 付近まで加熱した高温黒体放射炉の温度を上記と同様に決定し、プランクの放射則から黒体放射の分光放射輝度を算出し、黒体放射の相対分光放射照度値（相対分光分布）を得る。分光放射照度標準電球と黒体放射を比較測定し、分光放射照度標準電球の 500 nm の分光放射照度値を用いて、式 (19) と同様の計算を行うことで、黒体放射の 500 nm での分光放射照度値を決定する。黒体放射と仲介用標準光源として用いる標準重水素ランプを比較測定することで、200 nm から 400 nm における分光放射照度値が標準重水素ランプに与えられる。このようにして確立した分光放射照度標準（紫外）は、2009 年に 200 nm から 400 nm の波長域において、JCSS 制度に基づく標準供給を開始した。

標準供給体系において、仲介用標準光源となる分光放射照度標準電球および標準重水素ランプ（標準光源）は複数個用意され、群での管理が行われている。さらに、標準光源を基準とした比較測定により、ワーキングスタンダードとして同様の群が設けられ、通常の校正業務ではこれらと被校正対象との比較を行うことで値付けを行っている。標準光源およびワーキングスタンダードは、点灯による劣化や点灯条件の変化が考えられるため、各標準電球は点灯履歴の管理が行われており、NMIJ 校正からの累積点灯時間が 20 時間（標準重水素ランプは 30 時間）を超えない範囲で値の見直しが行われる。

Fig. 11 に NMIJ から校正事業者への標準供給の体系を示す。分光放射照度標準と分光放射照度標準（紫外）はそれぞれ、定格 100 V (500 W) のハロゲン電球と、30 W の重水素ランプを仲介用標準光源として用いる。

250 nm から 2500 nm の分光放射照度標準では、特定副標準器である分光放射照度標準電球群が設けられており、これらの値を NMIJ が校正している。特定副標準器に基づく特定二次標準器の校正は、日本電気計器検定所 (JEMIC) によって行われる。一方、200 nm から 400 nm の分光放射照度標準（紫外）では、特定副標準器が設けられていないため、NMIJ が有する標準ランプ群を用いて、直接校正事業者の特定二次標準器に対する jcsc 校正を行っている。

3.2 日本の分光放射照度標準の歴史

1967 年に国際照明委員会 (CIE) に測光放射委員会が組織され、1973 年に最初の国際比較を行うことが決定された。これを受け、我が国でも分光放射照度標準の立ち上げが 1968 年に開始された^{39), 40)}。初期の標準開発は、放射源として用いる高温黒体放射炉の開発から始まった。高温としての到達目標温度を 2500 K に設定し、既成の真空高温電気炉を改造して内部に黒鉛製炉心を設置することで高温黒体放射炉が作製された。この黒体放射炉の温度決定には光高温計が用いられ、金の凝固点を利用した定点黒体放射炉と高温黒体放射炉を光高温計で測定し、その放射輝度の比から温度を算出した。様々な波長で同様の測定を行った結果、2400 K で高温黒体放射炉の温度は ±2 K に収まる精度で温度が決定された。しかし黒体放射炉の温度が低く、2.2.2 で述べた 2 枚の精密アパーチャを用いた放射輝度－放射照度変換に基づく測定が特に短波長域で困難であったことなどから、黒体放射炉から直接分光放射照度の値を分光放射照度標準電球と比較測定する方法ではなく、一旦、黒体放射炉とタングステンリボン電球（定格 3.5 V, 30 A）の分光放射輝度と比較し、タングステンリボン電球へ分光放射輝度

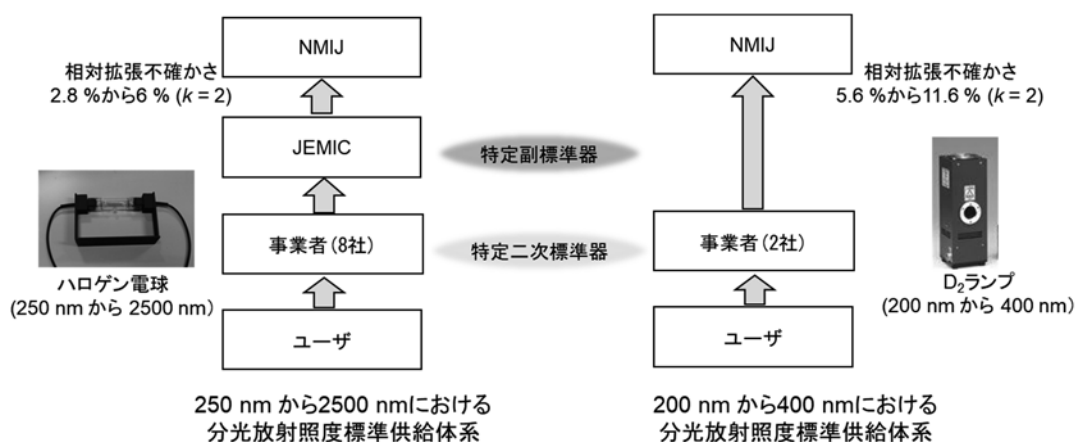


Fig. 11 NMIJ における分光放射照度の標準供給体系

値の値付けを行った。その後、タングステンリボン電球と分光放射照度標準電球からの放射を比較することで、分光放射照度標準電球の相対分光分布を求めた。そして、分光放射照度標準電球の相対分光分布から、分光放射照度の絶対値を導く方法として、拡散反射面の分光放射輝度率を用いた。分光放射輝度率とは、同一条件で測定対象面を照射して観測したときの完全拡散反射面からの放射輝度に対する測定対象面からの放射輝度の比である。ここで、完全拡散反射面とは、反射された放射の空間分布が、放射が反射される半球面の全ての方向で、放射輝度が一定でかつ反射率が1となる仮想物体である。黒体放射によって分光放射輝度の絶対値 $L_{e,\lambda}(\lambda)$ が与えられた分光放射照度標準電球と、分光放射輝度率が既知の拡散反射面を分光放射照度標準電球から所定の距離に正対させたときの、拡散反射面の法線から 45° 方向の分光放射輝度とを比較測定することにより、分光放射照度標準電球の分光放射照度 $E_{e,\lambda}(\lambda)$ の絶対値は、

$$E_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{\pi R}{\beta_\lambda(\lambda)} L_{e,\lambda}(\lambda) \quad (20)$$

となる。ここで、 $\beta_\lambda(\lambda)$ は拡散反射面の分光放射輝度率、 R は拡散面の分光放射輝度とタングステンリボン電球の分光放射輝度との比である。加えて、この分光放射照度標準電球に対して、1970年以前に確立していた全放射照度標準の値を用いた測定も行われた。分光放射照度標準電球および全放射照度標準電球からの放射を分光放射照度の波長範囲に合うようにバンドパスフィルタで 300 nm から 2750 nm の帯域だけ測定し、サーモパイル検出器で波長積分量に相当する放射量（放射照度）を測定する。分光放射照度標準電球の相対分光放射照度はわかっているので、得られた放射照度から換算して分光放射照度の絶対値を導く。この二種類の測定で得られた分光放射照度の値は 1.2 % の差があったため、この平均値を当時の日本の分光放射照度標準として定めた。そして、1973年に行われた第一回目の分光放射照度の国際比較は日本の電子技術総合研究所（後の産総研）が中央局として行われ、8か国の NMI が参加した。この国際比較に合わせて、日本では分光放射照度標準電球として使用可能な、安定性などの諸特性の改良を加えたハロゲン電球の開発も行われた⁴¹⁾。このときの設計指針では定格 500 W で 250 nm から 2500 nm に十分な発光をもち、均一な配光特性をもつことなどがあげられた。また、定格よりもわずかに低い 95 V で点灯することで電球の寿命を長くするなどの最適使用条件が見いだされた。この電球は現在でも NMIJ の分光放射照度標準電球の基礎として引き継がれている。この国際比較では 300 nm から 800 nm ま

での 7 波長点が測定波長として指定された。日本の結果は、400 nm から 700 nm の範囲では全参加機関の平均値と良い一致を見せたが、300 nm、350 nm、800 nm では 3 % ほどの差が報告されている⁴⁰⁾。

その後、1989年から1991年にかけて、測光・放射測定諮問委員会（CCPR）により米国の NIST を中央局として 250 nm から 2400 nm の波長範囲にて 2 回目の国際比較が行われた⁴²⁾。その当時、ITS-90 が採用されたことにより金の凝固点の定義が 1337.58 K から 1337.33 K へと変更となったことを受け、分光放射照度の値の修正が行われた。同時に、課題となっていた短波長域の光量不足による不確かさを改善するため、500 nm より短波長の波長範囲にシンクロトロン放射との比較に基づく校正値を導入することにより、紫外域での不確かさを大幅に改善した⁴³⁾⁻⁴⁵⁾。その一方で、1000 nm より長波長域で標準値が 4 % 程度も過小評価⁴⁶⁾されている問題点が報告された。これは当時使用したプリズム分光器による赤外領域での波長精度が低かったことと、検出器感度が不十分であったことによるものと考えられ、国際比較の後に分光器を含めた標準の見直しが行われた。

3.3 不確かさバジェット

Table 2 および Table 3 に、分光放射照度標準および分光放射照度標準（紫外）の不確かさバジェットを示す。波長ごとに測定条件が変化するため、それぞれ異なる不確かさが波長ごとに与えられる。短波長および長波長領域では不確かさが大きくなる傾向がみられる。短波長領域では、プランク放射の温度不確かさに対する感度が強いことが主に影響している。一方で、長波長領域では検出器感度が低いため、不確かさが大きくなっている。また、分光放射照度標準（紫外）では相対合成標準不確かさが通常の分光放射照度標準と比べて 2 倍ほど大きくなっている。これは短波長領域では温度変化に対する分光放射輝度の変化率が大きいプランク放射の特性を反映しているためである。これに加え、3000 K で動作する黒体放射炉の場合、200 nm での分光放射輝度は 500 nm に比べ 10^{-4} 倍であるため、検出器へ入射する光量が少ないことも影響している。

3.4 トレーサビリティ体系

Fig. 12 に日本の分光放射照度標準に関するトレーサビリティ体系図を示す。

前述の通り、日本の分光放射照度標準の実現方法は、高温黒体放射炉の温度決定は温度標準にトレーサブルな定黒体放射炉の放射輝度との比較を行っているため、

Table 2 分光放射照度標準の不確かさバジェット

不確かさの要因	相対標準不確かさ (%) *					
	250 nm から 350 nm	350 nm から 450 nm (350 nm 超)	450 nm から 600 nm (450 nm 超)	600 nm から 830 nm (600 nm 超)	830 nm から 2300 nm (830 nm 超)	2300 nm から 2500 nm
分光放射照度標準電球の 分光放射照度校正の相対標準不確かさ				1.4		
分光放射照度常用標準電球に 関係する比較校正における 相対標準不確かさ (分光放射照度標準電球との比較)				0.16		
比較校正における相対標準不確かさ (動作温度の高い黒体との比較)	1.2	0.7	0.29	0.49	0.9	2.1
分光放射照度常用標準電球と 被校正電球との比較校正における 相対標準不確かさ	0.31	0.27	0.16	0.16	0.49	1.6
相対合成標準不確かさ	1.9	1.6	1.4	1.5	1.7	3.0

*最終的に被校正電球に値付けられる分光放射照度値に対する相対標準不確かさを示す

Table 3 分光放射照度標準（紫外）の不確かさバジェット

不確かさの要因	相対標準不確かさ (%) *		
	200 nm から 230 nm	230 nm から 370 nm (230 nm 超)	370 nm から 400 nm (370 nm 超)
分光放射照度標準電球の 分光放射照度校正の相対標準不確かさ			1.4
分光放射照度常用標準電球に 関係する比較校正における 相対標準不確かさ (分光放射照度標準電球との比較)			0.09
比較校正における相対標準不確かさ (動作温度の高い黒体との比較)	5.61	2.44	2.27
分光放射照度常用標準電球と 被校正電球との比較校正における 相対標準不確かさ	0.43	0.43	1.41
相対合成標準不確かさ	5.8	2.8	3.0

*最終的に被校正電球に値付けられる分光放射照度値に対する相対標準不確かさを示す

温度標準へとトレーサブルとなっている。また、光源から集光系までの距離などの幾何学条件はすべて長さ標準へとトレーサブルな体系となっている。電源の点灯制御および検出器からの信号出力の読み取り等に用いるデジタルマルチメータは電気標準にトレーサブルとなるように校正したものを使用している。

4. 海外の国家計量標準機関 (NMI) での分光放射照度標準

4.1 概要

本章では、海外の主要な NMI における分光放射照度標準の実現に向けたこれまでの取り組みと現状の不確かさについて調査した結果を報告する。

4.2 海外の NMI における分光放射照度標準の状況

4.2.1 イギリス国立物理学研究所 (National Physical Laboratory: NPL)

NPL では、温度決定に絶対放射温度計を用いた検出器ベースの標準体系が構築されている。NPL では ITS-90 の成立前後から絶対放射温度の研究がなされており、レンズ特性の評価法などが確立されている^{47), 48)}。放射温度計に用いる検出器は、極低温放射計にトレーサブルなトラップ検出器で値付けられている。絶対放射温度計は 313 nm から 1500 nm のピーク波長のものが開発されている。また、NPL は最も早く熱分解黒鉛を炉心に用いた黒体放射炉を導入した国の一つで、1990 年後半から VNIIOFI, PTB と共同でこの高温黒体放射炉の評価を開

始している³⁴⁾。そして、黒体の温度を合成標準不確かさ 0.5 K で決定した^{31), 38)}。NPL では 3050 K に加熱した黒体放射炉を 800 nm 帯を透過する光学フィルタを使った絶対放射温度計で測定を行っている。Table 4 に NPL での高温黒体放射炉の温度決定に関する不確かさバジェットを示す。NPL では絶対放射温度計による温度測定による不確かさは 0.2 K 程度まで低減することができている。また、温度決定に大きく寄与している要因はアパーチャ面積や放射源からの距離で決定する幾何学因子と高温黒体放射炉の安定性・均一性に由来するものとなっている。この黒体放射炉は 3050 K で動作中に温度決定への不確かさが 0.05 % 以下となるような安定性で制御されている⁴⁹⁾。

分光放射測定では PMT, Si フォトダイオード, InGaAs フォトダイオード, InSb 検出器の各検出器を波長によって切り替えながら計測を行う。1600 nm より長波長では InSb 検出器を液体窒素冷却し、ロックインアンプを用いた交流測定が行われる。Fig. 13 に波長による不確かさの内訳を示す。ここで、Type A の不確かさは測定値のノイズに由来するもので、Type B の不確かさには波長ずれや高温黒体放射炉の温度決定不確かさから由来する成分が含まれる。分光放射照度の不確かさは 300 nm より短波長の紫外領域と 1600 nm より長波長の赤外領域で大きくなっている。短波長での不確かさは Type A 不確かさと、Type B 不確かさがどちらも大きな値をとっており、この領域の黒体放射の光量が少ないことと温度変化に対する放射照度の変化が大きいことが原因と考えられる。一方で、赤外領域では、計測ノイズ由来の Type A 不確かさが主因となっており、検出器を含めた計測方法に注意が必要であることが分かる。

4.2.2 米国国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology: NIST)

NIST の標準放射源の研究は電球の黎明期である 1913 年から開始されており、黒体放射炉からカーボンフィラメントをもつ電球への放射照度の値付けが行われた^{50), 51)}。1990 年代までは金点黒体放射炉を用いて光高温計で黒体放射炉の温度を決定する手法がとられていたが、温度決定の難しさから検出器ベースの分光放射照度標準の確立が望まれていた。NIST では 1996 年に絶対放射温度計の開発が行われており⁵²⁾、250 nm から 1540 nm までの絶対放射温度計が開発されている。絶対放射温度計と定点黒体放射炉の両方で黒体の温度を測定し、0.5 K 以内で一致を示すことが確認された⁵³⁾。また、これを受け、2000 年に新しく検出器ベースの分光放射照度標準が確

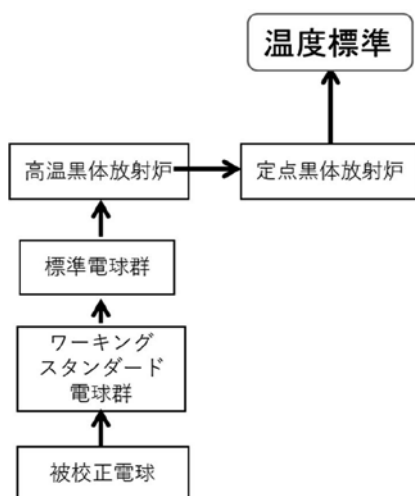


Fig. 12 NMIJ における分光放射照度標準のトレーサビリティ体系

Table 4 NPLの温度決定不確かさ³⁸⁾

Uncertainty component	Uncertainty as a percentage of value, where appropriate	Temperature uncertainty (K)
Geometric factor	0.067 %	0.344
Stability of blackbody	0.050 %	0.258
Uniformity of blackbody	0.035 %	0.179
Lens transmittance	0.029 %	0.149
Filter Radiometer absolute responsivity	0.022 %	0.115
Size of source effect	0.020 %	0.103
Voltage measurement and out of band		0.077
Emissivity	0.012 %	0.06
Amplifier gain	0.005 %	0.026
Filter Radiometer relative responsivity		0.005
Mathematical approximations		0.004
Overall Temperature uncertainty		0.523

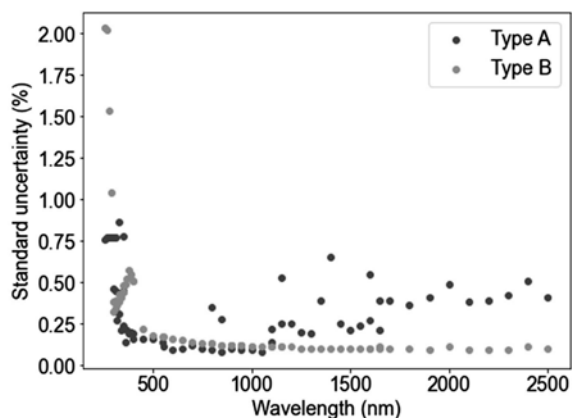


Fig. 13 NPLでの各波長における不確かさ要因の寄与の比較³⁸⁾

立された。これにより、分光放射照度標準は極低温放射計を経て電気標準へ、また、アパーチャ面積の測定を経て長さ標準へとトレーサブルな標準となった。この体系では、2950 Kでの高温黒体放射炉の動作時に拡張不確かさで0.86 Kでの温度決定が可能となった⁵⁴⁾。NISTでの分光放射測定は、450 nmまでの紫外領域では光電子増倍管を、1100 nmまでの領域ではSi フォトダイオードを用い、2500 nmまでの近赤外領域ではInGaAs フォトダイオードを用いて行われた。InGaAs フォトダイオードを用いた測定では交流測定が行われている。

また、分光放射照度標準の高度化とは別に、校正時の省力化が検討されている。分光放射照度標準のような既

に確立され、ランプの特性などが十分に分かっている系の場合、比較校正を複数回行ってあまり不確かさは小さくならず、校正を一回で終わらせた場合の不確かさとほとんど変わらない。このため、比較校正を一回だけにすることで時間とランプの消耗を省略することが検討されている⁵⁵⁾。また、複数の波長の分光放射照度を絶対放射照度計で計測することで校正を行う方式の検討も行われている⁵¹⁾。

4.2.3 ドイツ連邦物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: PTB)

PTBも1990年代から絶対放射照度計の開発に取り組んでおり、検出器ベースの分光放射照度標準を確立している。PTBでは、NPLやNISTと異なり、広帯域の絶対放射照度計が温度決定に用いられており、合成標準不確かさで0.5 Kでの高温黒体放射炉の温度決定が可能となっている⁵⁶⁾。高温黒体放射炉は2960 Kから3090 Kの範囲で運用されている。他に特筆すべき点として、高温黒体放射炉や電球の測定の際に、集光光学系を切り替えることでモニタ用の電球を測定できるシステムが採用されており、異なる放射源同士の比較測定の際の不確かさを低減する取り組みがなされている³⁸⁾。分光放射測定においては800 nmまでの幅広い波長で光電子増倍管を用いた直流測定が行われ、1650 nmまでをInGaAs フォトダイオード、2500 nmまでをInSb 検出器による交流測定が行われている。

また、通常は他国と同様に、標準電球群とワーキングスタンダード群の階層が設けられた体系の中で分光放射照度の校正を行うが、人工衛星に搭載する分光器など、より小さな不確かさが必要となる用途のために、被校正検出器を高温黒体放射炉と直接比較する取り組みも行われている⁵⁷⁾。

4.2.4 中国計量科学研究院 (National Institute of Metrology: NIM)

NIMでは温度標準にトレーサブルな定点黒体放射炉を用いた温度決定が行われている³⁸⁾。温度測定には全波長型の熱型放射温度計が用いられており、2004年の基幹比較(CCPR-K1.a)の時点では、放射温度計の校正はITS-90の定義定点が用いられていた。この温度決定の合成標準不確かさは0.87 Kと報告されている。その後、温度決定手法の高度化に取り組んでおり、2011年のVNIOFIとの二国間比較の際には、Pt-C(白金-炭素)共晶点およびRe-C(レニウム-炭素)共晶点といったITS-90より高温の温度目盛りを用いて校正することで、3000 Kで動作している高温黒体放射炉の温度決定の合成標準不確かさを0.64 Kまで低減させている⁵⁸⁾。分光放射測定は400 nmまでを光電子増倍管、1100 nmまでをSiフォトダイオード、2500 nmまでをInGaAsフォトダイオードを用いて行っている。800 nmから2500 nmまでの赤外領域では交流測定を行う。

また、さらなる不確かさの低減として、WC-C(炭化タングステン-炭素)包晶点を用いた定点黒体放射炉からの黒体放射と分光放射照度標準電球とを直接比較する試みが報告されている⁵⁹⁾。温度目盛りとなる定点黒体放射炉を直接比較対象として利用することにより、温度決定に由来する不確かさを考慮する必要がなくなり、大きな不確かさ改善が期待される。一方で、放射量を稼ぐために開口を大きく取ったことから定点黒体放射炉の温度安定性の改善が必要であることと、比較のための分光放射測定を温度定点が実現されている10分程度の時間で行わなければならないことなどが課題として挙げられている。

4.2.5 ロシア国立光学・物理学測定研究所 (All Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements: VNIOFI)

VNIOFIでは歴史的に高温黒体放射炉の開発が重点的に行われてきた。1990年代後半には熱分解黒鉛を炉心に用いた黒体放射炉を世界ではじめて開発し、その特性評価などについての多くの研究がなされてきた³³⁾⁻³⁵⁾。

また、共晶点や包晶点を利用した定点黒体放射炉を開発してきた経緯から、温度定点を利用した温度決定方法が用いられている。温度測定には単色放射温度計を使用しており⁶⁰⁾、放射温度計はCo-C(コバルト-炭素)共晶点およびRe-C(レニウム-炭素)共晶点、そしてWC-C(炭化タングステン-炭素)包晶点を用いた定点黒体放射炉で校正されている。高温黒体放射炉の温度測定の直前に、WC-C定点黒体放射炉を放射温度計で確認することで、放射温度計のドリフトの効果を低減している。通常、3020 Kで高温黒体放射炉を運転しており、温度決定の合成標準不確かさは0.7 Kとなっている。

4.2.6 諸外国の分光放射照度標準の実現方法に関して

諸外国においても、高温黒体放射炉からの黒体放射をプランクの放射則を用いて放射を求め、分光放射照度標準電球に値を移すことにより標準の維持・供給に供する、という点では多くの共通点がみられる。各国とも1990年代から2000年代にかけて、VNIOFIが開発したBB3200pgやBB3500Mといった熱分解黒鉛を炉心にもつ黒体放射炉を導入していった。また、2000年代には、従来の金などの定点黒体放射炉を用いた温度決定方法から転換し、新しい測定体系での分光放射照度標準の確立が行われてきた。

各国の違いとしては、高温黒体放射炉の温度を決定する手法が挙げられ、これによってトレーサビリティ体系も異なっている。Fig. 14に示すように、NPL, NIST, PTBのような検出器ベースの絶対放射温度計を確立した標準では、絶対放射温度計は測光・放射測定における一次標準である極低温放射計にトレーサブルな体系となり、電気標準へとつながる。一方で、NMIJ, NIM, VNIOFIなど温度定点を実現する定点黒体放射炉を用いて、放射温度計を校正する手法を用いる標準では、温度標準にトレーサブルな体系となる。

Table 5に各国の温度決定手法と温度決定における合成標準不確かさを示す。絶対放射温度計を確立したNMIでは、3000 K付近で動作中の高温黒体放射炉の温度を0.5 Kの合成標準不確かさで決定することが可能であることが分かった。定点黒体放射炉を用いた温度決定手法では、比較的大きな温度決定の不確かさがみられる一方で、ITS-90を超える温度定点(Re-C, WC-Cなど)を用いた場合には1 K以下の温度決定不確かさを実現できることが分かった。

4.3 不確かさの比較

今回調査した各NMIの表明しているCMC(Calibration

and measurement capabilities : 校正測定能力⁶⁾の相対拡張不確かさを示したグラフを Fig. 15 に示す. 一般的に, 黒体放射からの光量が少なくなる紫外領域 (短波長側) と検出器感度が弱くなる近赤外領域 (長波長側) で不確かさが増加する傾向がみられた. また, NMIJ の不確かさは全波長帯域において他の NMI に比べて大きいことがわかる. これは, 分光放射照度標準電球への値付けに際しての不確かさが大きいことに由来する.

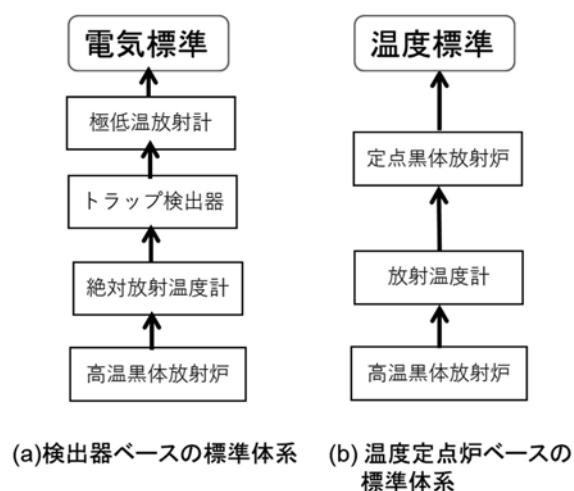


Fig. 14 温度決定手法による標準体系 (a) 検出器ベース (b) 温度定点ベース

5. 今後の課題と展望

5.1 分光放射照度標準の高精度化に向けた取り組み

本調査研究を通じて, 4.2 で示した通り, NMIJ の分光放射照度標準の不確かさは, 他国の主要 NMI と比べると全波長域に渡って大きいことが明らかとなった. 第1章で述べた, 多様な分光放射測定の基準として高いニーズがあり, かつ高精度化の要望の強い分光放射照度標準については, この先, 主要 NMI に比肩する不確かさをもつ分光放射照度標準を確立するための高度化を図ることが重要である. 本調査研究からは, 分光放射照度標準の実現に際しての温度決定の不確かさが大きく影響を与えることが分かったため, まずはこの不確かさ要因を低減するアプローチの導入を考えている. その上で, 3000 K において 1 K 以内の不確かさでの温度決定を行うことを目指している. この目標を達成するために必要な技術的改良点として, (i) 高温黒体放射炉の動作特性などの改善と (ii) 温度決定手法の改善, が挙げられる.

これまで NMIJ で使用されてきた高温黒体放射炉は通常の黒鉛を炉心として用いたものを利用していた. このため, 200 nm から 2500 nm の波長域での分光放射照度標準の実現に必要な 3000 K 前後の温度で動作させる際に, 炉心の消耗が激しく, 高温動作時の長期的な安定性にも課題があった. また, 従来型の高温黒体放射炉はアルゴン雰囲気を実現するために合成石英窓で封止する仕様であり, 黒体放射の測定の前後で, 窓の分光透過率に

Table 5 各 NMI の温度決定不確かさと 300 nm における相対拡張不確かさ ($k=2$)

	温度決定手法	高温黒体放射炉の温度	300 nm での分光放射照度	Ref
		決定の標準不確かさ ($k=1$)	校正の相対拡張不確かさ ($k=2$)	
NMIJ	定点黒体放射炉 (Cu 点)	1.5 K	3.8 %	(38)
PTB	フィルタ温度計	0.50 K	0.8 %	(38)
NIST	フィルタ温度計	0.43 K	1.5 %	(38)
NPL	フィルタ温度計	0.52 K	1.5 %	(38)
NIM	定点黒体放射炉 (Re-C 点)	0.64 K	1.8 %	(58)
VNIIOFI	定点黒体放射炉 (Re-C 点) (+ 定点黒体放射炉 (WC-C 点))	0.7 K	1.0 %	(58)

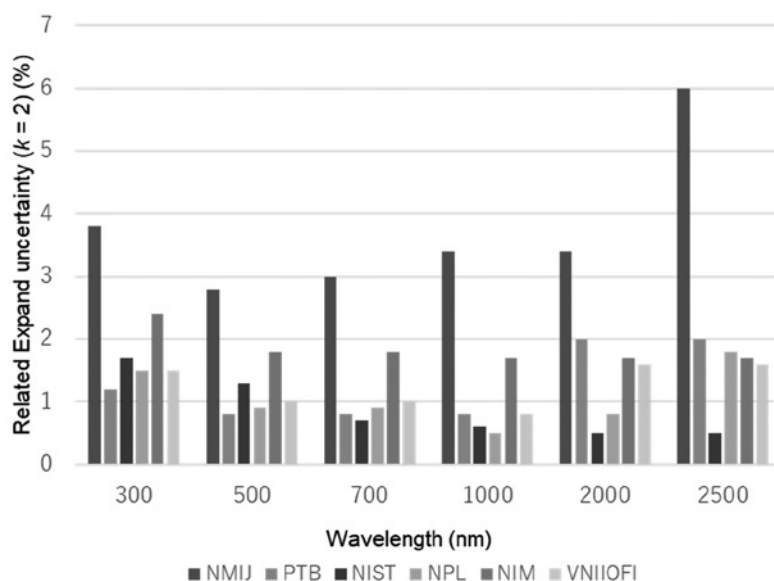


Fig. 15 各NMIの波長ごとの校正測定能力の比較

有意な変化がみられたが、測定中の分光透過率の経時的な変化を正確には評価できておらず、付随する不確かさ推定にも課題がある。

こうした課題を踏まえて、NMIJでは最近、新たにVNIIOFIが開発した高温黒体放射炉を導入した。この高温黒体放射炉は、熱分解黒鉛の炉心を持ち、高温運転時の消耗を低減できることから、3500 Kまでの高温での運転も可能となる。最高到達温度の上昇により、特に短波長域での測定再現性の改善が期待される。さらに、高温での安定性にも優れており、黒体放射炉の時間安定性の向上が期待できる。また、開口部の窓がなく、アルゴンガスを流しながら高温動作できる機構をもつことから、黒体放射を直接測定することができる。これによって窓の分光透過率の変化に由来する不確かさをなくすることができる。

高温黒体放射炉の温度決定手法の改善について、これまでのNMIJの方法は、銅の凝固点を利用した定点黒体放射炉と高温黒体放射炉の分光放射輝度の直接比較に基づいていた。銅の凝固点(1337.77 K)と3000 Kの黒体放射では分光放射輝度が1000倍程度も異なるため(Fig. 16)、高温黒体放射炉の放射輝度測定の際に、分光放射計の信号の飽和を避けるため減光フィルタが用いられていた³⁷⁾。温度決定にはこのフィルタの影響を考慮するため、温度の比較の際の不確かさ増大の一因となっていた。既に幾つかのNMIでは、検出器ベースの温度決定手法を確立し、絶対放射温度計による温度決定を行うことで、分光放射照度標準の不確かさの改善を実現してい

る。一方、定点黒体放射炉との分光放射輝度の比較から温度決定を行う体系を採用しているNMIにおいても、比較対象の温度定点により高温のものを用いることで、1 Kを下回る不確かさでの温度決定を実現している。例えば、Re-Cの共晶点(2747.84 K)と3000 Kで運転している高温黒体放射炉の放射輝度比は2倍程度である。この場合、放射輝度比が同程度であるため、同じ条件での放射輝度比較が可能である。NMIJでもこれらの測定技術を導入することで不確かさの低減を図ることが必要である。また、複数の温度決定手法を用いて温度測定をすることで信頼性評価も検討が必要である。このような異なるトレーサビリティ体系をもった手法を比較することで、より信頼性における温度決定が可能になると考えられる。

近年、産業界での紫外放射の利用や、紫外殺菌の需要の高まりに伴い、紫外域における放射照度センサの高度化が望まれている。短波長領域では、プランクの放射則の性質から、温度決定の不確かさによる放射輝度の変化率が大きい。また、3000 K程度の黒体放射では紫外領域での放射量は十分でなく、ノイズによる不確かさの寄与も大きい。これらの理由から、分光放射照度標準(紫外)では200 nmから230 nmの範囲で、相対標準不確かさが5%を超えている。温度決定手法を改善することに加え、新しい高温黒体放射炉の運転温度を上げることにより、紫外域の放射量を10倍から100倍程増大することができる。このような取り組みを行い、不確かさを従来の半分以下まで低減させることができると期待され

る。紫外の分光放射照度標準の不確かさを低減することによって、この標準に連なるトレーサビリティ体系で校正される紫外光源および検出器の不確かさの低減が可能となり、測定信頼性向上につながる。このような取り組みを行うことで、計測技術の面から社会課題の解決への貢献を目指すことが重要である。

5.2 仲介光源の代替の検討

分光放射照度標準の高精度化に向けた取り組みと併せて、仲介用標準光源についても十分な検討が必要である。2.3.3で示した通り、仲介用標準光源は、分光放射照度をはじめとする光源に由来する測定量において、比較測定に基づく日常的な校正における基準としてトレーサビリティを介する役割を果たしているほか、絶対測定によって実現される標準値を維持する上でも必要不可欠である。国際比較に際して各参加機関を巡回する標準器としても長年にわたって用いられている。

前述の通り、現在、分光放射照度標準の主たる仲介用標準光源としてハロゲン電球が用いられているが、LED光源の台頭により、白熱電球やハロゲン電球などの従来型の光源の需要が低下し、製造中止または大幅縮小の傾向が世界的に加速している。また、EUではエネルギー効率の低い従来型光源の製造・販売が規制され始めている。こうした動きに連動して、分光放射照度標準電球をはじめとする各種標準電球についても、製造・販売の中止が相次いでおり、世界的に入手困難な状況が始まっている。このため今後も安定的に、標準を維持・供給していくためには、新たな仲介用標準光源を開発する必要がある。Fig. 17に示すようにNMIJでは可視域を中心に標準LEDの開発が行われており⁶²⁾、仲介用標準光源の

一つと期待される。標準LEDは、紫色または青色LEDの光を緑色、赤色領域で蛍光を発する蛍光体に照射することで、可視域で連続スペクトルを実現している。また、LEDの短波長化が進んでいる一方で、現状の標準LEDは近赤外域には放射をもたないことから、分光放射照度標準が対象とする200 nmから2500 nmの広い波長範囲をカバーすることができない。このため、LEDに基づく新たな標準光源には近赤外領域で連続スペクトルをもつ光源の開発が、仲介用標準光源に関する技術課題として重要になると思われる。一例として、特異な結晶構造に蛍光中心元素を添加することによる近赤外領域にブロードな蛍光をもつ蛍光体の検討など、仲介用光源の代替となる光源の実現に向けた要素技術の研究が期待される。

同時に、標準光源としての利用という観点で、様々な既存光源から代替光源の可能性を探索することや、エー

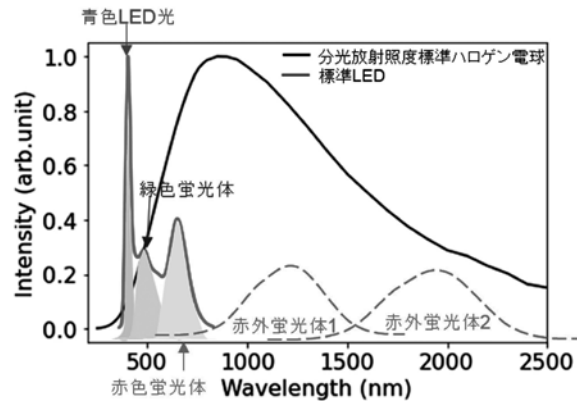


Fig. 17 分光放射照度標準電球と標準LEDの発光スペクトル

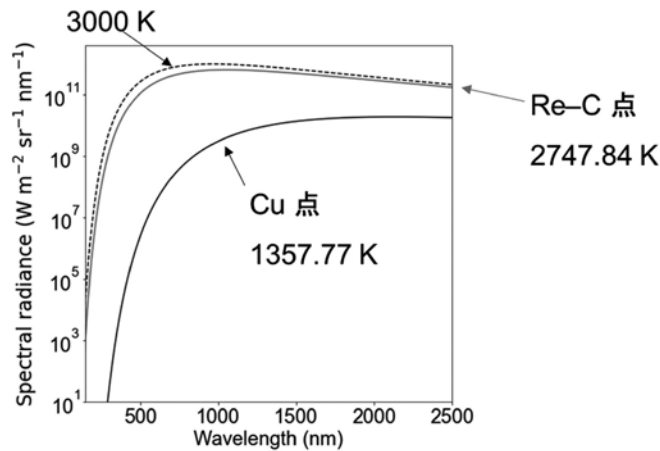


Fig. 16 定点黒体放射炉と3000 Kの黒体放射の分光放射輝度

ジング処理など性能向上のための付加プロセスの開発、小型の高温黒体放射炉の開発による仲介用標準光源としての可能性検証など、多方面からのアプローチを視野に入れて、今後の研究の展開を図っていくことが重要である。

6. まとめ

本調査研究では、分光放射照度標準の実現手法および不確かさ要因とトレーサビリティ体系を調査するとともに、国際的な研究開発動向を調査した。それらの調査内容を踏まえた今後の研究の課題および方向性を示した。

測光・放射測定において最も基本的な測定の一つである分光放射測定を行う上で、分光放射照度標準は基幹標準量として産業界での利用や標準の組み立てなど重要な役割を担っている。分光放射照度標準の実現には標準放射源として高温黒体放射炉が用いられ、温度決定と幾何条件から求めた分光放射照度と仲介用標準光源を比較することで、分光放射照度の値付けを行う。我が国の分光放射照度標準は、銅点の定点黒体放射炉および高温黒体放射炉を用いた体系で実現されており、温度標準に基づくトレーサビリティ体系をもつ。他国のNMIでは、絶対放射測定の適用やより高温の温度定点を用いることで、3000 K付近において1 K以下の不確かさで高温黒体放射炉の温度決定が確立しており、我が国よりも小さい不確かさを実現している。我が国でも分光放射照度標準の不確かさの低減に向けて、温度決定手法の高度化が特に重要な課題となる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、指導をいただきました産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 光放射標準研究グループ 薮洋司グループ長および光放射標準研究グループの皆様へ感謝いたします。

参考文献

- 座間達也, 計測と制御 **53**, 623 (2014).
- 薮洋司, 国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準 **67** (2019).
- 照明学会, 光の計測マニュアル (1990).
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Health Physics **87**, 171-186
- 居島修, 高野松美, 高層気象台彙報 **76**, 29 (2019).
- R. Shimokawa, I. Saito, Y. Miyake, H. Ikeda, F. Nagamine and S. Igari, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **48**, 69 (1997).
- 小野晃, 佐久間史洋, 日本リモートセンシング学会誌 **36**, 425 (2016).
- 中澤由莉, 産総研計量標準報告 **9**, 229 (2015).
- M. Planck, Verhandlungen der Dtsch. Phys. Gesellschaft, 1900, 2, 237.
- G. Autio and E. Scala, Carbon N. Y. **4**, 13 (1966).
- V. I. Sapritsky and A. V. Prokhorov, Appl. Opt. **34**, 5645 (1995).
- T. Sagawa, J. Spectrosc. Soc. Japan **24**, 317 (1975).
- S. Kikuta, Nihon Kessho Gakkaishi **18**, 65 (1976).
- M. Richter, J. Hollandt, U. Kroth, W. Paustian, H. Rabus, R. Thornagel and G. Ulm, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. **467-468**, 605 (2001).
- P.-S. Shaw, T. C. Larason, R. Gupta, S. W. Brown, R. E. Vest and K. R. Lykke, Rev. Sci. Instrum. **72**, 2242 (2001).
- A. Gottwald, M. Richter, P.-S. Shaw, Z. Li and U. Arp, Metrologia **48**, 02001 (2011).
- 佐久間史洋, 小野晃, 服部晋, 計測と制御 **33** 5, 415 (1994).
- 佐久間史洋, 光学 **26** 12, 657 (1997).
- H. Preston-Thomas, Metrologia **27** 1, 3 (1990).
- CCT: Mise-en-pratique for the realization of the kelvin in the SI, (2019). <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-kelvin.pdf>.
- 山田善郎, 中野享, 国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準 **43** (2019).
- J. Fowler and M. Litorja, Metrologia **40**, S9 (2003).
- J. B. Fowler, R. S. Durvasula and A. C. Parr, Metrologia **35**, 497 (1998).
- A. Lassila, P. Toivanen and E. Ikonen, Meas. Sci. Technol. **8**, 973 (1997).
- 山田善郎, 計測と制御 **42**, 918 (2003).
- E. R. Woolliams, K. Anhalt, M. Ballico, P. Bloembergen, F. Bourson, S. Briau, J. Campos, M. G. Cox, D. del Campo, W. Dong, M. R. Dury, V. Gavrilov, I. Grigoryeva, M. L. Hernanz, F. Jahan, B. Khlevnoy, V. Khromchenko, D. H. Lowe, X. Lu, G. Machin, J. M. Mantilla, M. J. Martin, H. C. McEvoy, B. Rougié, M. Sadli, S. G. R. Salim, N. Sasajima, D. R. Taubert, A. D. W. Todd, R. Van den Bossche, E. van der Ham, T. Wang, A. Whittam, B. Wilthan, D. J. Woods, J. T. Woodward, Y. Yamada, Y. Ya-

- maguchi, H. W. Yoon and Z. Yuan, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **374**, 20150044 (2016).
- 27) D. H. Lowe, A. D. W. Todd, R. Van den Bossche, P. Bloembergen, K. Anhalt, M. Ballico, F. Bourson, S. Briaudeau, J. Campos, M. G. Cox, D. del Campo, M. R. Dury, V. Gavrilo, I. Grigoryeva, M. L. Hernanz, F. Jahan, B. Khlevnoy, V. Khromchenko, X. Lu, G. Machin, J. M. Mantilla, M. J. Martin, H. C. McEvoy, B. Rougié, M. Sadli, S. G. R. Salim, N. Sasajima, D. R. Taubert, E. van der Ham, T. Wang, D. Wei, A. Whittam, B. Wilthan, D. J. Woods, J. T. Woodward, E. R. Woolliams, Y. Yamada, Y. Yamaguchi, H. W. Yoon and Z. Yuan, *Metrologia* **54**, 390 (2017).
- 28) CCT, Guide on Secondary Thermometry Specialized Fixed Points above 0 °C, (2018). <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Specialized-FPs-above-0C.pdf>.
- 29) B. Khlevnoy, I. Grigoryeva, K. Anhalt, M. Waehmer, E. Ivashin, D. Otryaskin, M. Solodilov and V. Sapritsky, *Metrologia* **55**, S43 (2018).
- 30) Albert Parr, R. Datla and J. Gardner, *Optical Radiometry* (2005) 1st ed.
- 31) E. R. Woolliams, "Development and evaluation of a high temperature blackbody source for the realisation of NPL's primary spectral irradiance scale" A thesis submitted to the University of Manchester for the degree PhD Physics in the Faculty of Science and Engineering, (2003).
- 32) A. L. Marshall and F. J. Norton, *J. Am. Chem. Soc.* **72**, 2166 (1950).
- 33) V. I. Sapritsky, B. B. Khlevnoy, V. B. Khromchenko, B. E. Lisiansky, S. N. Mekhontsev, U. A. Melenevsky, S. P. Morozova, A. V. Prokhorov, L. N. Samoilov, V. I. Shapoval, K. A. Sudarev and M. F. Zelener, *Appl. Opt.* **36**, 5403 (1997).
- 34) P. Sperfeld, J. Metzendorf, N. J. Harrison, N. P. Fox, B. B. Khlevnoy, V. B. Khromchenko, S. N. Mekhontsev, V. I. Shapoval, M. F. Zelener and V. I. Sapritsky, *Metrologia* **35**, 419 (1998).
- 35) V. I. Sapritsky, B. B. Khlevnoi, V. B. Khromchenko, S. N. Mekhontsev, A. V. Prokhorov, L. N. Samoilov, V. I. Shapoval, K. A. Sudarev and M. F. Zelener, *Proc. SPIE* 2815, *Optical Radiation Measurements III* (1996).
- 36) T. Zama and I. Saito, *Proc. 25th Sess. CIE D2*, 26 (2003).
- 37) T. Zama and I. Saito, *Proceeding NEWRAD*, 281 (2005).
- 38) E. R. Woolliams, N. P. Fox, M. G. Cox, P. M. Harris, and N. J. Harrison, *Metrologia* **43**, 02003 (2006).
- 39) 鈴木守, 南条基, 羽生光宏, 長坂武彦, 上田勇, 湊秀幸, 電子技術総合研究所研究報告 第742号, (1973).
- 40) M. Suzuki and N. Ooba, *Metrologia* **12**, 123 (1976).
- 41) 鈴木守, 長坂武彦, 羽生光宏, 山村恭平, 西堀稔, 照明学会雑誌 **57**, 528 (1973).
- 42) M. Habu, K. Katori, T. Saito, I. Saito, M. Nishi, H. Onuki and T. Nagasaka, *J. Illum. Eng. Inst. Japan* **75**, 194 (1991).
- 43) T. Zama, K. Awazu and H. Onuki, *J. Electron Spectros. Relat. Phenomena* **80**, 493 (1996).
- 44) T. Zama and H. Onuki, *J. Spectrosc. Soc. Japan* **47**, 129 (1998).
- 45) T. Zama, T. Saito and H. Onuki, *J. Electron Spectros. Relat. Phenomena* **101-103**, 991 (1999).
- 46) J. H. Walker, R. D. Saunders, J. K. Jackson and K. D. Mielenz, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **96**, 647 (1991).
- 47) N. P. Fox, J. E. Martin and D. H. Nettleton, *Metrologia* **28**, 357 (1991).
- 48) E. R. Woolliams, D. F. Pollard, N. J. Harrison, E. Theocharous and N. P. Fox, *Metrologia* **37**, 603 (2000).
- 49) E. R. Woolliams, N. J. Harrison and N. P. Fox, *Metrologia* **37**, 501 (2000).
- 50) W. W. Coblentz, *Bull. Bur. Stand.* **11**, 87 (1914).
- 51) H. W. Yoon and C. E. Gibson, *Nist Sp-250-89*, (2011).
- 52) T. R. Gentile, J. M. Houston and C. L. Cromer, *Appl. Opt.* **35**, 4392 (1996).
- 53) H. W. Yoon and C. E. Gibson, *Metrologia* **37**, 429 (2000).
- 54) H. W. Yoon, C. E. Gibson and P. Y. Barnes, *Appl. Opt.* **41**, 5879 (2002).
- 55) G. T. Fraser, C. E. Gibson, H. W. Yoon and A. C. Parr, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **112**, 39 (2007).
- 56) P. Sperfeld, "Entwicklung einer empfangergestützten spektralen Bestrahlungsstärkeskala", (1999).
- 57) P. Sperfeld, S. Pape and S. Nevas, *AIP Conf. Proc.* **1531**, 801 (2013).
- 58) C. H. Dai, B. Khlevnoy, Z. F. Wu, Y. F. Wang, M. Solodilov, S. Kolesnikova, I. Grigoryeva, Y. D. Lin and L. Li, *Mapan - J. Metrol. Soc. India* **32**, 243 (2017).
- 59) Y. Wang, C. Dai, B. Khlevnoy, I. Grigoryeva, L. Li, Z.

- Wu, Y. Xie and S. He, *Opt. Express* **28**, 28430 (2020).
- 60) M. L. Samoylov, S. A. Ogarev, B. B. Khlevnoy, V. B. Khromchenko, S. N. Mekhontsev and V. I. Sapritsky, *AIP Conference Proceedings*, **684**, 583, (2003).
- 61) <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search>, Key comparison database (KCDB).
- 62) Y. Nakazawa, K. Godo, K. Niwa, T. Zama, Y. Yamaji and S. Matsuoka, *Metrologia* **57**, 065024 (2020).