

OPTRONIC[®]
LABORATORIES

分光放射測定ガイド

 日本総代理店
旭光通商株式会社
www.kyokko.com

Rev A- Dec 2022

製品改良のポリシーの一環として、いつでも仕様を変更する権利を有します

目次

分光放射測定法	2
分光放射量と測光量（定義と単位）.....	2
放射量.....	2
測光量.....	4
分光放射量.....	6
透過率.....	6
反射率.....	7
分光感度特性.....	8
分光放射標準	8
黒体標準.....	9
基本的な分光放射標準.....	10
特殊用途の分光放射標準.....	14
一般的な分光放射計システム	19
波長分散素子.....	19
コリメート光学系と集光光学系.....	19
波長駆動機構.....	20
迷光.....	20
ブロッキングフィルター.....	21
グレーティングの最適化.....	21
ディテクター.....	22
信号検出システム.....	22
モノクロメーターのスループットと校正係数.....	23
スリットとアパーチャーの選択.....	24
スループットとバンドパス.....	29
性能仕様	31
f値.....	31
波長精度/分解能/再現性.....	32
バンドパス.....	33
感度とダイナミックレンジ.....	33
迷光.....	34
スキャン速度.....	34
安定性.....	35
ソフトウェアと自動化.....	35
分光放射測定システム	35
光源測定/入力光学系/システム校正.....	35
分光透過率.....	41
分光反射率.....	42
分光応答性.....	44
測光パラメータと測色パラメータの計算	46
三刺激値.....	46
CIE1931色度.....	47
UCS1976 u、v、u'、v'座標.....	47
相関色温度.....	47
CIE LAB/LUV色空間.....	47
色差と演色評価数.....	48
ディテクター測光パラメータ.....	49
測光計算および測色計算の使用限界.....	49
精度およびエラー	49
ランダムエラー、システムティックエラー、ヒリオディックエラー.....	49
エラーの原因 測光と分光放射測定.....	50



分光放射測定法

分光放射量と測光量（定義及び単位）

放射測定は、電磁放射エネルギーの測定に関する科学技術です。より一般的には、単に「光放射の測定」と呼ばれます。放射計が光スペクトル全体(1nm~1000 μ m)にわたって放射源から放出される全放射エネルギーを測定し、分光放射計が放射源のスペクトル含有量に関係するのに対し、測光は人間の目が感応する光スペクトルの一部(380nm~780nm)のみに関係します。より具体的には、標準的な測光観測者が知覚する「可視」スペクトルの放射エネルギーの測定に関するものです。この標準的な測光観測者は、「平均的な」人間であると考えられます。

放射源を説明するために、多くの放射量、分光放射量、および測光量が使用されています。これらの定義に関して過去にはいくつかの不一致がありましたが、本書で説明するものは、現在最も一般的に使用されているものです。

放射量

以下の放射量は、光放射の測定で最も頻繁に使用されるものです。

放射エネルギー(Radiant Energy)は、放射源から放出される全エネルギー(J)です。**放射エネルギー密度(Radiant Energy Density)**とは、単位体積当たりの放射エネルギー(Jm^{-3})です。

放射束(Radiant PowerまたはFlux)は、単位時間当たりの放射エネルギー(Js^{-1} またはワット)です。

放射発散度(Radiant Exitance)は、放射源から放射される全放射束を放射源の表面積で割った値(Wm^{-2})です。

放射照度(Irradiance)は、表面のある要素に入射する全放射束をその要素の表面積で割ったもの(Wm^{-2})です。

放射強度(Radiant Intensity)は、ある方向への単位立体角あたりの光源から放射される全放射束(Wsr^{-1})です。

放射輝度(Radiance)とは、ある光源の放射強度をその光源の面積で割ったもの($\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$)です。図1.1に放射輝度を定義するための幾何学的構造を示します。ステラジアンとは、球の中心を頂点とし、球の半径に等しい長さの辺を持つ正方形の面積を球の表面から切り取る立体角と定義されます。

放射率(Emissivity)とは、ある光源の放射束密度と、同じ温度の黒体放射体の放射束密度の比です。放射エネルギーがエネルギー単位で評価される純粋な物理量は、表1.1に定義されています。



放射量	記号	定義式	単位
放射エネルギー Radiant Energy	Q, Q_e		J (Joule)
放射エネルギー密度 Radiant Energy Density	w, w_e	$= dQ / dV$	$J m^{-3}$
放射束 Radiant Power or Flux	Φ, Φ_e	$= dQ / dt$	$J s^{-1}$ または W (Watt)
放射発散度 Radiant Exitance	M, M_e	$= d\Phi / dA_{source}$	$W m^{-2}$
放射照度 Irradiance	E, E_e	$= d\Phi / dA_{surface}$	$W m^{-2}$
放射強度 Radiant Intensity	I, I_e	$= d\Phi / d\Omega$	$W sr^{-1}$
放射輝度 Radiance	L, L_e	$= d^2\Phi / d\Omega(dA\cos\theta)$ $= dI / dA\cos\theta$	$W m^{-2} sr^{-1}$
放射率 Emissivity	ϵ	$= M / M_{blackbody}$	

表 1.1 基本的な放射量

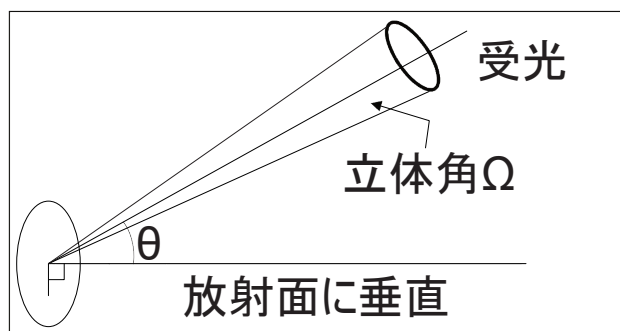


図 1.1 放射輝度を定義するためのジオメトリ

測光量

表 1.1 にリストされている放射量が標準測光観測者によって評価される場合、それらは類似の測光量に対応します (表 1.2 を参照)。放射量と測光量の各ペアは、同じ主記号(「放射率」と「発光効率」を除く)で表され、下付き文字のみで区別されます。下付き文字「e」(または下付き文字なし)は、物理(放射量)量の場合に使用され、下付き文字「v」は測光量に使用されます。測光光出力を定義するために使用される一般的な用語は多数ありますが、光の測定の基本単位はルーメンです。他のすべての測光量にはルーメンが含まれます。光の測定に関する8つの基本測光量を以下に定義します。

光エネルギー(Luminous Energy)は、標準的な 2°視野観察者 (lm s) によって知覚される総エネルギーです。

光エネルギー密度(Luminous Energy Density)は、単位体積あたりの光エネルギー (lm s m⁻³) です。

光束(Luminous Flux)は、単位時間(lm)あたりの光エネルギーです。

光束発散度(Luminous Exitance)は、光源の表面積 (lm m⁻²) に対する放出された光束の比率です。

照度(Illuminance)は、表面に入射する単位面積当たりの光束のことで、表面が一様に照射された場合の光束を表面の面積で割った値(lm m⁻²)です。

光度(Luminous Intensity)は、ある方向への単位立体角あたりのの光束 (lm sr⁻¹またはcandela)です。

輝度(Luminance)は、光源の面積に対する光度の比(cd m⁻²)です。

発光効率(Luminous Efficacy)は、全光束と全放射束の比(lm W⁻¹)です。

測光量	記号	定義式	単位
光エネルギー Luminous Energy	Q_v	$= K_m \int V(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot d\lambda$ 0.25	lm s
光エネルギー密度 Luminous Energy Density	w_v	$= dQ_v / dV$	lm s m ⁻³
光束 Luminous Flux	Φ_v	$= dQ_v / dt$	lm (lumen)
光束発散度 Luminous Exitance	M_v	$= d\Phi_v / dA_{\text{source}}$	lm m ⁻²
照度 Illuminance	E_v	$= d\Phi_v / dA_{\text{surface}}$	lm m ⁻²
光度 Luminous Intensity	I_v	$= d\Phi_v / d\Omega$	lm sr ⁻¹ または cd (candela)
輝度 Luminance	L_v	$= d^2\Phi_v / d\Omega(dA\cos\theta)$ $= dI_v / dA\cos\theta$	cd m ⁻²
発光効率 Luminous Efficacy	K	$= \Phi_v / \Phi$	lm W ⁻¹

表 1.2 基本的な測光量



分光放射量

放射エネルギーまたは関連する量を単色成分で測定すると、波長の関数になります。したがって、これらの量の指定には、「分光放射照度」のように「分光」という形容詞を前に付ける必要があります。各量の記号自体の後に、波長(λ)の記号が続きます。たとえば、分光放射照度は記号 $E(\lambda)$ または $E_e(\lambda)$ を持ちます。光源の分光分布がわかっている場合は、ルーメンとワットの間の次の関係を使用して、一方から他方に変換できます。

$$\Phi_v = 683 \int \Phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \text{ [lm]}$$

ここで、 $\Phi(\lambda)$ は光源の分光放射パワー分布（「単位波長間隔あたりのワット数」で表されます）、 $V(\lambda)$ は相対明所視視感度関数（正規化された555nm）、 λ は波長（通常、ナノメートルで表されます）です。683 [lm W⁻¹] の値は、555nmでの絶対発光効率です。光源の測光または放射測定を行う場合、光源の分光分布が正確にわからない限り、測光単位から放射単位に、またはその逆に変換することはできません。レーザーなどの単色光源の特殊なケースでは、式は次のように簡略化されます。たとえば、出力が633nmの1mW HeNeレーザーの場合、光束は、

$$\begin{aligned} \Phi_v &= 683 \cdot \Phi(633) \cdot V(633) = \\ &= 683 \times 10^{-3} \times 0.2353344 = 0.1607 \text{ lumen} \end{aligned}$$

一般に、光源の分光出力を測定すると、最も正確な測光データが得られます。

透過率

透過率は、入射放射または光束に対する透過放射または光束の比率です。

$$\text{視感透過率: } \tau_v = \frac{\Phi'_v}{\Phi''_v}$$

$$\text{分光透過率: } \tau(\lambda) = \frac{\Phi'(\lambda)}{\Phi''(\lambda)}$$

ここで、上付き文字「t」は透過光束を表し、上付き文字「i」は入射光束を表します。媒体（または物体）の全透過率(θ)は、正透過率(θ_r)と拡散透過率(θ_d)の2つの部分で構成されます。ここで、

$$\theta = \theta_r + \theta_d$$

スネルの屈折法則(5)に従って入射角から出射角を予測できるように、放射または光束がサンプルを通過する場合、透過率は正則と呼ばれます。光束がサンプルを通過する際に散乱する場合、または巨視的なスケールでは、表面の粗さのためにスネルの法則が適用されなくなる場合、透過率は拡散と呼ばれます。



媒体の視感(または測光)透過率は、放射源の分光組成に依存します。したがって、媒体の測光透過率を決定する際には、放射源の性質を特定する必要があります。たとえば、青色フィルターの測光透過率は、放射源が2856Kの色温度で動作するタングステン ランプである場合よりも、放射源がキセノンアークランプである場合の方がかなり高くなります。特定の放射源に対する媒体の測光透過率は、測光法または分光放射分析法で決定できます。ただし、測光技術を使用する場合は、指定された放射源(または指定された放射源と同じ分光分布を持つ放射源)を使用する必要があります。

分光放射の計算を行う際、一般的に光源分布を考慮しないことがあります。これは今でも有効で、媒体の光透過率は「等しいエネルギー源」、つまり可視スペクトル上のすべての波長で等しいエネルギーを持つ光源を指定することと同じですが、これは比較測光のための実用的な光源ではないことを心に留めておく必要があります。測光透過率(τ_v)は、分光透過率($\tau(\lambda)$)と指定光源の相対的な分光分布($\Phi(\lambda)$)の知識から、次のように計算されます。

$$\tau_v = \int \lambda \tau(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

ここで、 $V(\lambda)$ =相対光度(Relative Photopic Luminosity Efficacy)です。

反射率

反射率とは、入射した放射束または光束に対する反射した放射束または光束の割合のことです。

光反射率(Luminous Reflectance) : $\rho_v = \Phi_v^r / \Phi_v^i$

分光透過率(Spectral Transmittance): $\rho(\lambda) = \Phi^r(\lambda) / \Phi^i(\lambda)$

ここで、上付き文字「r」は反射光束、上付き文字「i」は入射光束を意味します。

物体の全反射率(ρ)は2つの部分に分けられます。鏡面反射率(ρ_s)と拡散反射率(ρ_d)です。

$$\rho = \rho_s + \rho_d$$

鏡面反射は、鏡のように光反射の法則に従って、散乱や拡散を伴わない放射束や光束の反射から構成されています。

拡散反射は、反射された光束があらゆる方向に散乱することです。



光透過率と同様、物体の光反射率は放射源の分光組成に依存し、光反射率を求める際には放射源の分光組成を知るか指定する必要があります。

また、光透過率と同様に光反射率も測光式と分光放射式で求めることができます。

分光感度特性

分光感度 $R(\lambda)$ は、一般に特定の波長 $\Phi(\lambda)$ の既知の放射束を照射したときに
ディテクター
光検出器 $s(\lambda)$ から発生する電気信号のことで、次の関係式を用いて決定されます。

$$R(\lambda) = s(\lambda) / \Phi(\lambda)$$

検出器の出力信号の単位は、アンペア、ボルト、カウント/秒などです。光検出器（ディテクター）の分光感度特性は、パワー応答または放射照度応答のいずれかになります。パワー応答は、一般に単色光束で検出器を満たしていないことを含みますが、放射照度応答は、単色光束で検出器を一様に過充填することを含みます。ディテクター（光検出器の受光部分）の領域がわかっている場合、およびディテクターの感度が均一である場合は、あるタイプの応答から別のタイプの応答に変換することができます。

分光放射標準

光放射の正確な測定には、安定で特性の良い光度計を使用するだけではありません。放射計や分光放射計の使用だけでなく、どこかで標準光源を使用する必要があります。この標準は、放射束の出力と幾何学的特性が正確に分かっている放射源や、応答が正確に分かっているディテクターの形で提供することができます。ほとんどの分光放射分析アプリケーションでは、システムを使用して光源の分光出力を測定する場合、標準光源を使用して測定システムを校正する必要があります。システムを使用してディテクターの分光応答を測定する場合、標準ディテクターを使用して測定システムを校正する必要があります。ここでは、NIST(米国国立標準技術研究所)が定めた基本的な分光放射計の標準器と、民間の校正機関で入手できる分光放射計の標準器について説明します。黒体標準を除き、可視域の分光放射輝度計に適した標準器のみを取り上げます。



多くの場合、「基本的な」分光放射標準光源は測定システムの校正には適していません。たとえば、公称分光放射照度が $0.1 [W m^{-2} nm^{-1}]$ の「基本的な」分光放射標準光源を使用して、6~10桁低い放射照度レベルを測定する測定システムを校正することは非常に困難です。必要なのは、測定対象の光源に匹敵する放射照度レベルを持つ「特別な目的」の低照度基準光源です。従って、校正が「基本」分光放射標準光源に基づく特別な目的に対応する分光放射標準光源について説明します。

黒体標準

可視スペクトルで使用できる分光放射標準光源のほとんどは、プランクの法則で定義されている黒体の分光放射輝度に基づいているため、黒体放射について簡単に説明します。黒体とは、入射した放射束を波長や入射角度によらずすべて吸収する、すなわち完全に黒い理論上の光源です。プランクの法則は、黒体の分光放射輝度 L_λ を次のように定義しています。

$$L_\lambda = \frac{c_1}{n^2 \lambda^5 \left[e^{\left(\frac{c_2}{n\lambda T} \right)} - 1 \right]} \quad [W cm^3 sr]$$

ここで

- c1 = 第1放射定数
- c2 = 第2放射定数
(1.4388 cm K)
- n = 空気の屈折率
(1.00027)
- λ = 空気中の波長 (cm)
- T = 熱力学的温度 (K)

放射束が物体に入射すると、反射(ρ)、透過(θ)、吸収(α)のいずれかになるため、以下ようになります。

$$\rho + \theta + \alpha = 1$$

物体に入射したエネルギーがすべて吸収されれば、吸光度は一となり、キルヒホッフの法則により、物体の放射率も一となります。現実には、すべての波長と温度にわたって完全な吸収体は存在しません。



黒色塗料、酸化金属、蒸着黒色など、0.9以上の吸収率を持つものは多数ありますが、「1」に近いものはありません。ただし、内部表面の吸収率が高い (≥ 0.9) 中空の等温筐体の壁に小さな穴を配置することにより、ほぼ完全な吸収体または放射体を形成できます。筐体の開口部に入射する放射束は次のような影響を受けます。

1. 入射した放射束の約90%が吸収されます。
2. 残りの10%は拡散反射されます(ただし、球の内面が拡散反射する場合)。
3. 放射束のごく一部は、1次反射の小さな開口部から漏れます。
4. 入射光束のかなり小さい光束が、より高次の反射率のために開口部から漏れます。

形状、材料の選択、加熱方法などを慎重に設計することで、吸収率や放射率が極めて「1」に近いデバイスを構築することができます。様々な放射筐体の実効放射率を計算する方法は数多く存在します。市販されている黒体には、さまざまな形状を持ち、さまざまな温度範囲で使用できるよう、異なる材料で構成されたものが多数あります。これらの黒体の中には、現場で持ち運べるものもあれば、さまざまな金属の凝固温度で動作する精巧な実験室用赤外線標準器もあります。しかし、これらの黒体のほとんどは、主に約1000nm以上の波長の赤外線で使用されています。可視スペクトルでの使用に適した黒体は、2500K以上の温度で動作させる必要があります。これらは非常に高価な装置であり、通常の実験室での校正には実用的ではありません。

基本的な分光放射標準

NISTの分光放射照度標準

1960年頃までは、黒体放射体を除いては、便利な分光放射照度標準は存在しませんでした。黒体は昔も今もほとんどの赤外線校正に使用される主要な標準ですが、UV、可視、および近赤外線での使用は非常に限られています。分光放射輝度のNISTスケールは、プランク放射方程式から決定される既知の温度の黒体から放射される放射束に基づいて校正されるタングステンリボンフィラメントランプで構成されます。

NISTが最初に選んだランプはGE30A/T24/3でした。モーグルバイポストベースを備え、公称定格は6 V、30Aです。放射エネルギーは、ランプ管体にある1.25溶融シリカウィンドウを通してフラットストリップフィラメントから放出されます。ウィンドウは、フィラメントの面と平行で、フィラメントの面から約3~4インチの距離にあります。分光放射値は、225~2400nmの波長範囲で報告されています。推定RMS(Root Mean Square二乗平均平方根)不確かさは、波長により、225nmで1.0%から2400nmで0.3%まで変化し、可視スペクトル全体で約0.6%です。代表的な分光放射輝度値を表1.3に示します。

分光放射輝度のタングステンリボンフィラメントランプ標準は、小さな領域の分光放射輝度を測定するために使用される分光放射計やその他の機器の校正に広く使用されています。ただし、これらの放射輝度標準の使用は、校正できる領域が小さいことと、標準が低波長で提供する放射輝度が低いことによって制限されます。これらの標準は、プラズマ、炉、またはその他の小さな領域の放射源の分光放射輝度を測定する場合に役立ちます。

これらの放射輝度標準は、正確に測定された開口部を備えた小さな精密スリットにフィラメントを注意深くイメージングすることにより、放射照度標準としても使用できます。次に、開口部からの距離での放射照度を計算できます。ただし、いくつかの問題があります。光源領域が非常に小さいため、放射照度レベルが制限されます。結像光学系の実効透過率または反射率を測定する必要があり、画角は限られています。

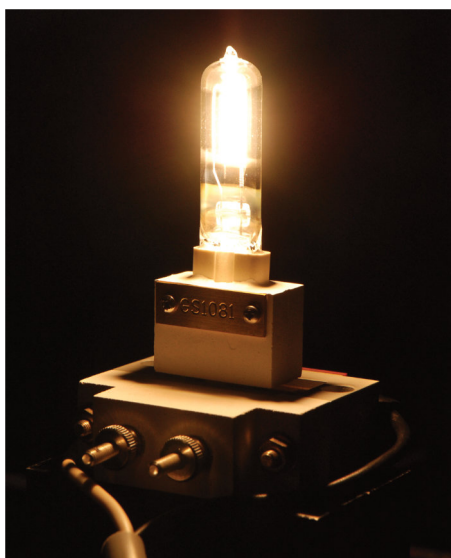


図1.2 FEL分光放射照度標準ランプ
バイポスト(片口金型)システム

λ [nm]	L_λ [$\text{Wcm}^{-3}\text{sr}^{-1}$]	T_{bb} [K]	λ [nm]	L_λ [$\text{Wcm}^{-3}\text{sr}^{-1}$]	T_{bb} [K]
225	1.805	2677.3	575	97830	2534.3
230	13.23	2677.1	600	113700	2521.5
240	21.11	2676.3	654.6	147300	2493.2
250	55.41	2674.7	675	158600	2481.9
260	102.7	2672.9	700	171800	2461.4
270	180.5	2671.0	750	194000	2440.6
280	302.8	2669.1	800	211800	2414.1
290	480.7	2665.4	900	229000	2356.7
300	731.4	2662.2	1050	223400	2269.4
325	1867	2653.0	1200	198100	2183.0
350	4003	2643.0	1300	177000	2125.9
375	7540	2632.4	1550	127300	1991.8
400	12770	2620.8	1700	102600	1916.3
450	29100	2596.9	2000	66390	1771.6
475	40160	2584.6	2100	57480	1736.0
500	52880	2572.0	2300	42780	1650.3
550	82060	2546.8	2400	37740	1611.1

表 1.3 タングステンリボンフィラメントランプの分光放射輝度と黒体温度の実測値

NIST分光放射照度標準器

NISTは、タングステンリボンフィラメントランプによる分光放射照度標準の問題点を解消するために、1963年に石英ハロゲンランプを分光放射照度標準として制定しました。GE社製200W石英ヨウ素ランプを調査した結果、分光放射照度の標準として使用できる特性を有していることが判明しました。このランプは、比較的良好な光学品質の小型石英筐体に収められた頑丈なランプです。このランプは、小型でフィラメントの面積が小さいため、かなり近距離で近似した点光源放射照度を得ることができ、分光放射計から0.5m以内に配置することができます。

タングステン・ハロゲンサイクルにより、3100Kという高い色温度でのランプ動作が可能です。このため、紫外線領域でより高い放射照度が得られます。これらの新しい標準は、250 nmから2500 nmの波長範囲で校正されました。1965年、NISTは200W標準器と同様の1000Wランプを導入しました。この標準は、元の200W標準の約5倍の放射照度レベルを持っていました。1975年、NISTは1000WのDXW型ランプから1000WのFEL型ランプに切り替えました。これらのFELランプは中型バイポストベースに改造され、キネマティックランプホルダーとの併用により、ランプの脱着が正確にできるようになりました（図1.2参照）。

FEL標準分光放射照度の校正は、NIST標準分光放射照度に基づき、250nmから2400nmの波長範囲にわたって校正されています。代表的な分光放射照度の値を表1.4に示します。推定されたRMSの不確かさは、250nmで2.23%、2400nmで6.51%と波長によって変化し、可視域では平均約1%の不確かさでした。

NIST標準ディテクター

NISTは、高精度の極低温放射計に基づく絶対分光応答性スケールを確立しました。表1.5は、NISTスケールに対して校正され選択されたシリコンディテクターに割り当てられた推定不確か性を示しています。NISTは、特定の波長での応答性均一性プロットも提供します。

λ [nm]	E_{λ} [Wcm ⁻³]	λ [nm]	E_{λ} [Wcm ⁻³]
250	0.182	550	101.7
260	0.320	600	137.5
270	0.531	654.6	161.6
280	0.833	700	190.3
290	1.258	800	221.9
300	1.830	900	231.6
310	2.592	1050	220.7
320	3.549	1150	203.0
330	4.752	1200	193.1
340	6.223	1300	173.3
350	7.998	1540	126.0
360	10.05	1600	166.9
370	12.46	1700	101.6
380	15.22	2000	67.1
390	11.31	2100	59.7
400	21.77	2300	46.0
450	44.06	2400	40.0
500	73.12		

表1.4 50cmでの1000W FELタイプランプの分光放射照度

特殊用途の分光放射標準

サファイア窓付き分光放射輝度計標準

この標準光源は、特殊改造されたタングステンリボンフィラメントランプ(GE 18A/T10/2P)と光学グレードのサファイアウィンドウで構成されています。これらの標準光源は、250nmから6000nmの全波長にわたって使用できる単一の放射輝度標準のニーズを満たすために、また、より高価で入手が困難なGE30A/T24/3に代わるものとして開発されました。サファイアウィンドウ付き標準光源の分光放射照度は、250nmから2400nmの波長範囲ではNISTの分光放射照度標準に、2400nmから6000nmの波長範囲では黒体校正標準にトレーサブルであることが確認されています。可視スペクトルにおけるNISTスケールに対するこれらの特殊目的標準の推定実効不確かさは2%です。

分光放射照度基準 (1000W DXW、200W、および45W)

1000W、200W、および45Wのワット数を持つ一連のタングステンハロゲンランプが、分光放射照度の特別な目的の標準光源として設定されています。これらの標準は、250nm~2400nmの波長範囲で分光放射照度のNIST FEL標準、および2400nmを超える波長の黒体校正標準に直接トレーサブルです。DXW1000W標準の分光放射照度がFEL1000W標準と同程度であるのに対し、200W標準と45W標準はそれぞれFEL1000W標準の約5倍、20倍の放射照度となっています。ただし、これらの標準はいずれも色温度約3000Kで動作させた場合の校正值です。従って、相対的な分光分布は全ての光源でほぼ同じです。NISTスケールに対する推定RMS不確かさは、可視スペクトルにわたって1%のオーダーです。

波長域	不確かさ[%]
$400\text{nm} \leq \lambda \leq 440\text{nm}$	± 0.7
$440\text{nm} \leq \lambda \leq 900\text{nm}$	± 0.22
$900\text{nm} \leq \lambda \leq 1000\text{nm}$	± 0.3
$1000\text{nm} \leq \lambda \leq 1100\text{nm}$	± 0.7

表 1.5 絶対応答性測定の不確かさ推定値[これは相対拡張不確かさ(k=2)です]。

プラグイン式タングステンランプ分光放射照度標準光源

分光放射照度計を正確に校正するために、プラグイン式の照度標準が用意されています(図1.3参照)。これらの標準は、色温度約3000Kで動作する小型の200Wタングステンハロゲンランプで構成されています。約13cmの短い作動距離により、通常より高いワット数の標準で得られる照度レベルよりも大幅に高い照度が得られます。光学アライメントの精度と高い放射照度の組み合わせにより、分光放射計をより正確に校正することができます。また、「プラグイン/アライメント済み」コンセプトにより、分光放射計の積分球入力光学系部分に取り付けるだけなので、通常、分光放射計標準に関連する面倒で時間のかかるセットアップとアライメントが不要になります。これらの標準は、可視スペクトルにおいて、NISTスケールに対するRMSの不確かさが1%と見積もられています。

積分球校正標準光源

本書に記載されているすべての分光放射照度標準光源は、分光放射輝度または分光放射照度のいずれかについて校正されており、1セットの条件、すなわち1つの指定された光源用電流、距離などについてのみ校正されています。さらに、これらの標準は、「プラグイン/プレアライン」標準を除き、すべて外気中で動作し、容易に減衰させることができません。多くの場合、分光放射輝度について正確に校正され、場合によっては分光放射輝度について校正された、大面積で均一に放射する光源が必要です。さらに、光源の放射輝度や放射照度の正確な減衰が望まれる場合もあります。慎重に設計された積分球とタングステンランプの組み合わせは、上記の基準を満たします。積分球校正標準光源は一般に、光源モジュール/光学ヘッドと個別の電子コントローラの2つの部分から構成されています。典型的な積分球光源の光源モジュールを図1.4に示します。このユニットには150Wのタングステン・ハロゲン反射光源が組み込まれており、光源と積分球の間にマイクロメーター制御の可変アパーチャーがあり、積分球へのフラックス入力を変化させることができます。積分球はPTFやBaSO₄などの高反射、拡散反射材料でコーティングされています。



図1.3 分光放射照度のプラグイン式プライアラインド標準

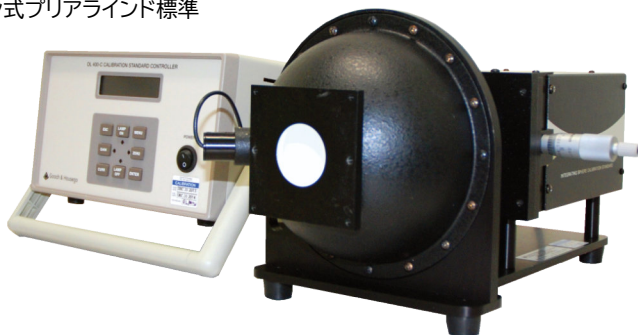


図1.4 低光量積分球校正用標準光源

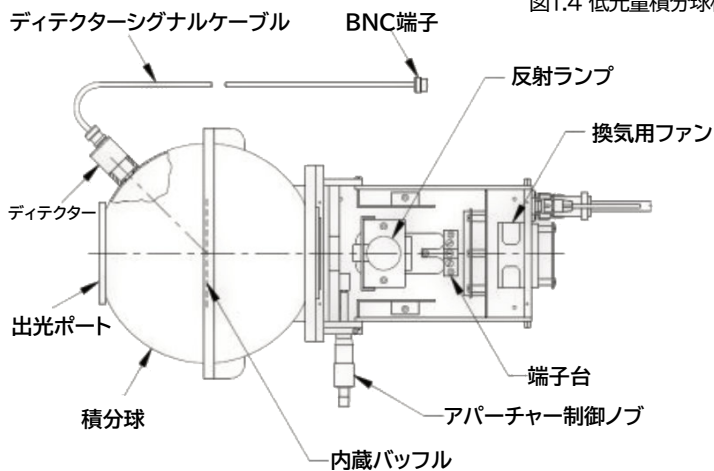


図1.5 積分球校正標準光源の断面図

これらの材料は、可視スペクトル全体で99%以上の反射率を有しています。積分球の入り口ポートにある可変アパーチャーにより、球の輝度を 10^6 以上の範囲で連続的に調整することができます。積分球内部壁面には、正確な光学応答を持つ精密シリコンディテクターとフィルターの組み合わせが取り付けられており、積分球の輝度をモニターしています。電子制御装置には、ランプ電源とディテクター用のアンプが含まれています。

光源モジュール／光学ヘッドは、異なるサイズの積分球で構成できるように設計されています。したがって、球の直径が大きくなるにつれて、出口(放射)ポートの直径を徐々に大きくすることができます。球の直径と出射口の直径の比率が4:1であれば、出射口での放射輝度の均一性は一般的に±0.5%となります。

積分球光源は放射照度が非常に均一で、放射領域が明確に定義されているため、一度分光放射輝度の校正を行えば、分光放射照度を計算することができます。なお、これらの積分球光源は、測光用標準光源としても広く用いられています。一般に、積分球内部のモニターとなる検出器／フォトピックフィルターは、球体の輝度が電子コントローラに表示されるように校正されます。

直径4インチ(Φ10cm)の積分球を組み込んだ積分球光源は、通常直径1インチ(Φ2.54cm)の放射口を持ち、輝度は $100,000 \text{ cd/m}^2 \sim 0.001 \text{ cd/m}^2$ に調整可能です。12インチ径(Φ30cm)の場合は、3インチ径(Φ7.6cm)の放射口があり、輝度は $12,000 \text{ cd/m}^2$ から 0.001 cd/m^2 まで調整可能です。一般的な推定不確かさは、NISTスケールに対して2%RMSです。

上記の積分球光源よりもさらに低い出力レベルを必要とする測定用途には、図1.5に示すような極低光量積分球光源があります。この光源は前述と同様ですが、光源の分光分布を変えずに積分球の輝度を減衰させるために2つの方法を用いています。

低ワット数のタングステン・ハロゲンランプは、ランプから球体の入口ポートまでの距離を5~30cmに変化させることができるよう、移動可能な治具に取り付けられています。積分球の入射口のすぐ前には、直径 $28 \sim 0.15 \text{ mm}$ の精密なアパーチャーが入った6ポジションのアパーチャーホイールが設置されています。このように、ランプと積分球の距離を変化させ、異なるサイズの開口部を入射口に挿入することで、放射口の輝度／放射輝度を正確に設定することができます。

この積分球光源は、光学系ヘッドが異なるサイズの積分球に対応できるように設計されています。このバージョンでは、 $10^{-5} \text{ cd m}^{-2}$ という低い輝度レベルを得ることができます。場合によっては、上記の積分球光源よりもさらに大きな放射面積を持つことが望まれます。

このような場合、30インチ以上の直径を持つ積分球が利用可能です。この積分球光源は、一般的に球体内部に1つ以上のランプが取り付けられています。減衰は、1つ以上のランプをオフにすることで実現されます。

一般に、積分球校正用標準光源の分光放射輝度値は、指定されたランプ電流に対して報告されています。動作電流を変化させると、分光放射輝度の大きさが変化するだけでなく、分光分布も変化します。従って、分光放射照度計の標準光源として使用する場合は、指定された電流でランプを動作させることが不可欠です。しかし、これらの積分球光源を基準として使用する場合は、この限りではありません。シリコンディテクター/明所視フィルターは輝度を測定し、これらがCIE明所視効果関数に正確に一致していれば、輝度表示の精度はランプ電流に依存しません。

ディテクター分光感度特性校正用標準光源

シリコンフォトダイオードには、200~1100nmの波長範囲において、パワーレスポンスまたは放射照度レスポンスによる分光感度特性の校正が可能なのが用意されています。これらの校正済みディテクターは、一般に1cm²の有効面積を持ち、便利なBNCコネクター付きの黒色陽極酸化アルミニウム製ハウジングに取り付けられています。また、取り外し可能な精密アパーチャーが付属している場合もあります。図1.6に典型的な分光感度特性のプロット（パワーレスポンス (A/W)）を示します。ディテクターは通常ゼロバイアス電圧で校正されます(短絡モード)。NISTのスケールに対するこれらディテクターの校正伝達誤差は、可視スペクトルにおいて0.5%のオーダーです。

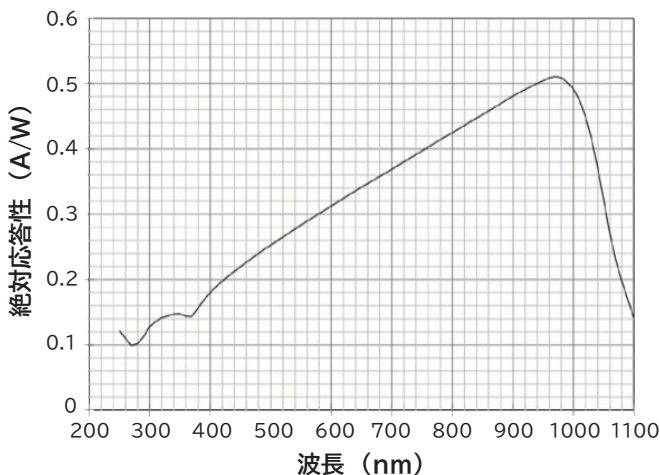


図1.6 代表的なシリコンディテクターの分光感度特性

一般的な分光放射計システム

分光放射計の心臓部には、光放射をスペクトル成分に分離するメカニズムがあります。最も一般的で優れた機構は、モノクロメーターです。

ここでは、モノクロメータの構成要素、システム全体の性能を決定する役割、およびユーザーがシステムを選択する際に注目すべき典型的な仕様について概説します。図1.13、1.14、1.16～1.18に示すような一般的な分光器は、入口・出口スリット、平行・集光光学系、グレーティングやプリズムなどの波長分散素子から構成されています。また、光学チョッパーやフィルターホイールなどの機構が含まれる場合もあり、モノクロメーターの内部に搭載されることが多いです。

波長分散素子

最近のモノクロメーターの多くは回折格子を用いていますが、プリズムを用いた古いタイプのモノクロメーターはわずかなものがまだ使用されています。回折格子はプリズムと比較すると欠点もありますが(主に後述する多次効果)、汎用性、使いやすさ、波長範囲、波長に対する分散が一定であることから、分光測定分野ではほとんど回折格子モノクロメータが使用されます。このように回折格子型モノクロメータは最も広く使われているため、ここでは他のモノクロメータを除いて説明します。

コリメート光学系と集光光学系

モノクロメーターの最初の光学部品は、通常コリメート光学部品(凹面鏡)で、入口スリットからの発散ビームをグレーティングに向かうコリメートビームに変化させます。グレーティングはこの平行光に作用し、波長に依存する異なる角度の平行回折ビームを生成します。グレーティングを回転させることにより、各波長が順番に集光光学系に当たり、出口スリットの位置で入口スリットの像が形成されます。モノクロメータには、図1.11に示すような湾曲したグレーティングを用いることで、コリメート光学系や集光光学系を不要にしたものがあります。一般に平面格子型モノクロメータよりコンパクトになりますが、グレーティングの交換ができなくなるため波長範囲に制限があります。

波長駆動機構

グレーティングを回転させる場合、現在、主にダイレクトドライブとサインバードライブの2つの駆動機構が使用されています。サインバー機構は、回折格子角度と波長のサイン関数依存性を、波長単位で一定のステップ数(ステップングモータ)を与える直線駆動機構に変換するのが基本です。この機構は、選択した波長を示す機械的なカウンターに簡単に接続できるため、旧式のモノクロメーターのほとんどに採用され、「マニュアル」システムで使用されることがありました。技術の進歩に伴い、信頼性の高い自己校正式モノクロメーターが開発され、使用前にカウンターを読み取る必要がなくなりました。カウンターをなくしたことで、サインバー駆動が不要になり、ダイレクトドライブ機構(グレーティングの角度を変えるごとに一定のステップ数を与える機構)の導入が可能になりました。ダイレクトドライブ機構は、いわば理論上のサインバーと考えることができ、正しい波長を得るために必要な角度を計算し、それを選択します。サインバー機構を排除することで、関連する多くの誤差を取り除くことができ、場合によってはグレーティングタレットと波長駆動機構を一体化することができます。

迷光

モノクロメータは、特定の波長成分を他の波長から分離するために使用されますが、実用的なモノクロメータは、残留する「帯域外」波長を透過させますので、これを迷光といいます。可視域の測定では、この影響はほとんどありませんが、ナイトビジョンシステムの測定など、特定の用途では、この迷光が分析対象である真の波長成分を妨害することがあります。このような場合、ダブルモノクロメータを使用することで、通常 10^{-4} の迷光レベルを 10^{-8} (モノクロメータに入る全検出可能放射線に対する検出迷光の比率で表される)にまで低減させることができます。ダブルモノクロメータとは、2つの同じモノクロメータの出力を2つ目のモノクロメータの入力とするものです。当然ながら、この場合、2つのモノクロメータを同じ波長に設定する必要があり、経験上、信頼性の高い結果を得るには、2つのモノクロメータが同じベースプレートと駆動機構を共有することが唯一の方法であることが分かっています。2台の単色分光器をボルトで固定する方法は、過去に何度も試されましたが(現在も試されています)、結果は芳しくありませんでしたので、この方法は避けるべきでしょう。

ブロッキングフィルター

グレーティングは回折によって光を分散させるため、図1.7に示すように、任意の波長の光が複数の方向(次数)に回折されることがあります。実際には、900nmの1次と450nmの2次、300nmの3次が同じ角度で回折することになります。そのため、900nmの光を測定する際には、450nmと300nmの成分を除去することが必要であり、そのためにブロッキングフィルターが使用されている。ブロッキングフィルターは、短波長を吸収し、長波長を透過させるフィルターです。例えば、550nmのブロッキングフィルターを使用すると、450nmと300nmの成分を吸収し、900nmはほとんど影響を受けません。可視領域では、一般に少なくとも2枚のフィルターが使用されます。1枚目はあらゆる紫外線成分をブロックし、2枚目は760nmで380nmの光の再発を防ぐためです。これらのフィルターは、スキャン中に適切な波長のビームに配置され、フィルターホイールの中に配置されて自動的に選択されることが多く、プロセス全体がユーザーにとって「透明」になっています。

グレーティングの最適化

グレーティングは、表面にエッチングされた多数の細かい間隔の線(または溝)で構成されています。この溝の密度は、1mmあたりの溝数($g\text{ mm}^{-1}$)で表され、モノクロメーターの波長の角度分離(分散)を決定するものです。また、溝の形状を変えることで、特定の角度の回折をより効率的に行うことができます。これはブレード処理と呼ばれ、目的の波長領域でモノクロメーターのスループットを向上させるために行われます。このため、グレーティングの使用可能な波長範囲は、ブレード波長の2/3から2倍というのが一般的な法則となっています。例えば、500nmでブレードしたグレーティングは、330nmから1000nmまで使用できるはずで、実際には、可視光の作業にはほとんどこれが選択されます。特定の光源(青や赤)の精度を上げるために他のグレーティングを選択することもできますが、最大効率と光応答関数のピークがほぼ一致するため、一般的な用途では500nmのブレード回折格子が最適となります。

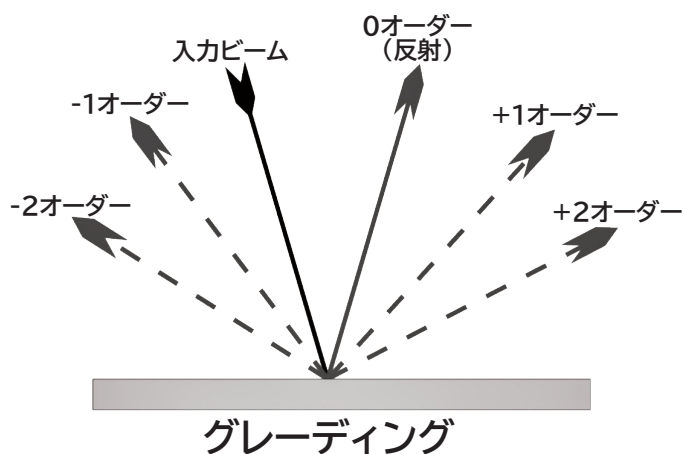


図1.7 回折格子からのさまざまな次数の回折

ディテクター

分光放射計の心臓部にはモノクロメーターがありますが、システムには必ずディテクターが存在します。ディテクターの選択は、測定する光量、必要な安定性、システムが必要とする非可視光アプリケーションによって決まります。ほとんどの分光放射計は、シリコンフォトダイオードと光電子増倍管(PMT)という2種類の可視光用ディテクターのいずれかを使用しています。シリコンフォトダイオードはほとんどの中～高光レベルのアプリケーションで使用でき、PMTは低光レベルで使用されます。シリコンフォトダイオードは使用可能な波長範囲が異なりますが、事実上すべてが可視波長に応答します。一方、PMTは使用可能な範囲がかなり異なり、明所視アプリケーションで日常的に使用されるのはトリアルカリ(S20)またはガリウム砒素PMTのみです。S20PMTは最大830nmの波長に応答します。これは通常の明所視アプリケーションに適していますが、ガリウム砒素PMTは最大930nmのより長い波長応答のため、ナイトビジョンテストに選択されます。

信号検出システム

多くの場合、信号検出システムと呼ばれるディテクターからの信号を増幅・処理する電子機器は、システムの性能に影響を与えます。例えば、シリコンディテクターからの電流を 10^{-12} A(1ピコアンペア)程度に分解できるDCアンプは、ほとんどのメーカーから容易に入手できますが、より優れた性能(10^{-15} A、または1フェムトアンペア)を持つサプライヤーも存在します。

シリコンディテクターの室温での固有ノイズは 10^{-15} A程度であるため、最高のアンプ以外は検出システムの感度範囲を狭め、ノイズを増加させることとなります。PMTのノイズと感度は、PMTの電圧と信号検出システムのタイプの両方に依存します。DC増幅モードでは、S20の暗電流は、室温でせいぜいピコアンペア程度です。したがって、増幅器はこれよりも低い感度範囲を必要としませんが、不必要にノイズを追加しないように高品質である必要があります。

AC増幅とも呼ばれるロックイン増幅も、PMTとシリコンディテクターの両方で使用できます。ここでは、光チョッパーが回転して、毎秒数十から数百（または数千）サイクル(ヘルツ)の周波数で光を交互に透過および遮断します。チョッピング周波数にロックされた増幅器は、サイクルの明期と暗期の差に比例する信号を生成します。この手法を使用して、ほとんどのノイズなど、チョッピング周波数にないコンポーネントを除去し、システムの暗電流ドリフトを補償できます。ただし、他の増幅器と同様に、ロックイン増幅器も信号にノイズを追加する可能性があり、シリコンディテクターやPMTなどの比較的ノイズの少ない可視検出器ではなく、赤外線ディテクターと一緒に使用する場合に最も役立ちます。

光子計数(PC)信号検出システムは、DCまたはACモードよりも高い感度を提供しますが、PMTに限定されます。シリコンフォトダイオード用のPC検出システムが開発され、市販されていますが、実用的な分光放射計として使用するには小さすぎるディテクターにしか使用できません。PCモードでは、光電子増倍管の光電面に当たった各光子が電流パルスを発生させます。このパルスは光電子増倍管の他の部分からの多数の小さなパルスと分離してカウントします。その結果、光電子増倍管に吸収された個々の光子を実際にカウントするシステムが完成しました。光子が最小の光量(元素の原子1個分)であることから、理論的に達成可能な究極の感度を示しています。

モノクロメーターのスループットと校正係数

分光測定を行う場合、各波長の光の強さと観測される信号の関連因子を決定する必要があります。

理論的には、システムを構成する各要素の寄与度がわかれば、これらの係数を算出することができます。しかし、実際には“概算”程度にしかなりません。正確な係数を求めるには、校正用標準器(各波長における光の強度が既知であるもの)を使用します。これらの校正標準光源は、正しい結果を得るために、NISTやその他の国立標準研究所にトレーサブルであることが必要です。

スリットとアパーチャーの選択

適切なスリットとアパーチャーの選択は、正しい分光放射測定の結果を得るために非常に重要ですが、ほとんどのユーザーにとって謎に包まれたままです。このセクションでは、そのような霧を払拭し、ユーザーが特定のアプリケーションに対してどのようなスリットや開口部を選択すべきかを明確に理解することを目的としています。モノクロメーターのスリットは長方形で、一般に幅よりも高さがあり、長辺がモノクロメーターの平面に対して垂直(つまり通常垂直)になるように配置されます。アパーチャーの形状は問いませんが、通常は円形であり、用途によってはスリットの代わりに使用されます。ここでは、最も一般的でスリットの形状とは大きく異なる円形のアパーチャーを想定しています。

入射光学系や出射光学系では、視野を確保するために円形の開口部が必要とされることが多いです。(望遠鏡や顕微鏡などの結像光学系)、ビームの収束・発散や均一性(コリメート光学系)、画像のサイズ(一部の反射、透過、検出器応答アクセサリ)などを定義するために、円形の開口部が必要となります。一般的に、開口部を必要としないアクセサリーは、積分球のような非イメージングタイプのみです。入射/出射光学系の要件により、常にアパーチャーまたはスリットを選択する必要があります。入口に取り付けるアクセサリーに絞りが必要な場合は、入口スリットの代わりに取り付け、出口に取り付けるアクセサリーに絞りが必要な場合は、出口スリットの代わりに取り付けることとなります。

理論的には、入口と出口のスリットに2つのアパーチャーを設置することができます。しかし、このような配置では、高さを正確に合わせる必要があり、温度やベンチの平面度などのわずかな変化でスループットが大きく変化してしまいます。したがって、このような不安定な配置は、特殊な用途を除いてほとんど使われず、一般には、モノクロメーターのどちらか、アクセサリーと対向する側にスリットを設けるのが望ましいとされています。

リミット・アパーチャの概念

大きな光源や非結像光学系では、入口開口(またはスリット)がモノクロメーターに入射する光のサイズと分布を制限します。しかし、その他の用途では、サイズや分布が他の要因で制限されることがあり、スリットやアパーチャーの選択(または存在)は無関係になります。例えば、分光放射強度の測定などでは、アパーチャーはモノクロメーターに入る像のサイズや形状を決定するものではなくになります。画像と同じサイズと形状を持つ「等価アパーチャ」を使用して、システムの期待される動作を決定する必要があります。同様に、光ファイバー(たとえスリット状のファイバーであっても)を使用する場合、スリット幅やアパーチャはファイバーより小さい場合のみ適用されます。ファイバーがスリット(またはアパーチャー)より小さい場合、システムの期待される動作はファイバーによって決定されます。光源の像を入射スリットに結像させる光源を使用する場合にも、同様の考慮が必要です。例えば、10x10mmのシリコンディテクターを使用する場合は5mmのスリットが限界開口となりますが、3x3mmのPbSディテクターを使用する場合は限界開口とならないからです。また、ディテクターが結像光学系によってモノクロメーターに結合されている場合でも、倍率の影響を考慮すると、ディテクターが限界開口を定義する場合があります。

スリット-スリットバンドパスとスリット機能

単色光源を使用する場合、モノクロメーターは出口で入口スリットの像を形成します。そのため、出口スリットがマスクとなり、ディテクターに到達する像の部分を決定します。波長が変化すると、画像は出口スリットを横切って移動し、波長に対するディテクター信号のスキャンはスリット関数と呼ばれ、半値全幅(FWHM)を見つけるために使用することができます。より一般的には、バンドパスと呼ばれます。スリット関数、つまりバンドパスは、理想的な装置であれば非常に簡単に計算することができます。1つは入口と出口のスリットが同じで、もう1つは異なる形状です。図1.8に示すように、ディテクターが出口スリットを通過するすべての光に等しく反応する場合、信号は入口スリットの像と出口スリットが形成するマスクの重なり面積に比例します。

これにより、スリットが等しい場合は三角形のスリット関数が、スリットが異なる場合はフラットトップの関数が得られます。異なるスリットの場合、イメージは出口のスリットより広くても同じ結果が得られるので、スリット関数はどのスリットが入口で、どのスリットが出口であるかに依存しません。

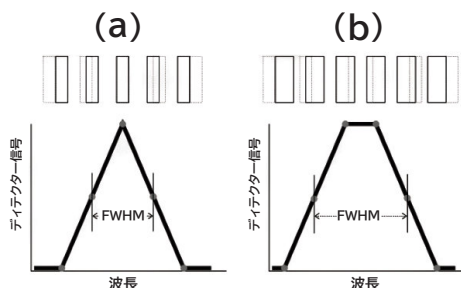


図 1.8 (a)等しいスリットと(b)異なるスリットのスリット関数とバンドパス

いずれの場合も、ディテクター信号は画像(破線)と出口スリット(実線)の重なり具合に比例します。この2つの形状が存在しますが、分光放射計で実用的なのは1つだけで、それは等しいスリットです。これは、スリットが異なると、小さいスリットではスルーポイント(したがって信号)が制限され、広いスリットでは解像度が低下するためであり、通常のスキャン間隔で鋭いスペクトルの特徴を測定すると、深刻なサンプリングエラーが発生する可能性があるからです。一方、等倍スリットでは、どのバンドパスでも最大限の信号が得られ、FWHM以下のスキャン間隔でも正確なピーク面積が得られます。実際のシステムでは、三角関数は頂点が丸くなり、ベースラインの切片も丸くなります。また、スリットが非常に狭い場合、関数は三角形ではなく、スキューガウシアン曲線に似ていることがよくあります。これらは、モノクロメーター系に見られるノーマル収差によるもので、一般的な原理には影響しません。

アパーチャスリットのバンドパスとスリット関数

スリット-スリット方式と同様に、入口開口の像が出口スリットで形成されますが、その結果得られるスリット関数はほとんど明らかではありません。アパーチャスリットの計算で重要な違いは、図1.9に示すように、形状が十分に不一致であるため、スリット関数に3つの可能性があることです。最初の(a)は、開口部がスリットよりはるかに大きい場合、コサイン曲線状のスリット関数が得られます。2番目の(b)は、両者の幅が同じで、ほぼ三角形の形状(ただし側面は「S字」)になり、スリット-スリット等価物と本質的に同じバンドパスが得られます。3番目の選択肢(c)は、開口部がスリットよりもずっと小さいので、「S字型」の側面を持つ平らな頂点のプロファイルが得られます。

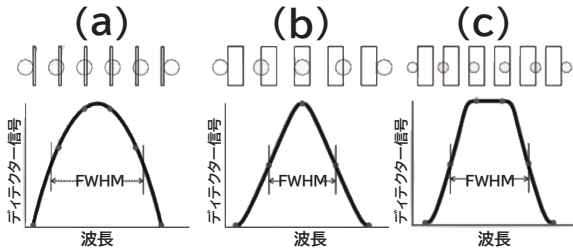


図1.9 (a) スリットよりもはるかに大きい開口、(b) スリットと同じ幅の開口、および (c) スリットよりもはるかに小さい開口の場合のスリット関数とバンドパス。いずれの場合も、検出器の信号は、画像(破線)と出口スリット(実線)の間の重なりに比例します。

スリット-スリット構成に適用される理由とまったく同じ理由で、最良の結果は、スリットとアパーチャの幅を可能な限り一致させることによって得られます。ただし、アパーチャとスリットのサイズは通常、視野や感度などの追加要因によって決定されるため、アパーチャよりも大きなスリットで測定を行うことは珍しくありません。開口数よりもはるかに小さいスリットが、一致する組合せよりもより良い結果をもたらすという状況はありません。上記の説明では、入口は絞り、出口はスリットとしましたが、モノクロメータを理想的なものとして扱っているので、逆にしても同じ結果になります。実際のシステムでは、収差によってスリットとアパーチャーの像が異なるため、この2つの構成にごくわずかな違いが生じることがあります。

分散、バンドパス、限界解像度

前のセクションでは、スリット関数の形状について説明しました。ただし、バンドパスに実際の値を設定するには、分散も既知である必要があります。分散(またはより正確には逆線形分散)は、スリットの平面内の1mmの距離における波長領域(nm)です。これは、モノクロメータの焦点距離と格子溝の密度(1mmあたりの溝数)によって異なります。特定のモノクロメータについて、1200 g/mm のグレーティングでの分散がわかっている場合(通常、メーカーから入手できます)、任意のグレーティングまたはスリット幅でのバンドパスは次の式を使用して計算できます。

$$B = \frac{1200 \cdot D \cdot S}{G}$$

ここで:

Bはバンドパス(nm)です。

Dは分散(nm/mm)です。1200g/mm のグレーティングを使用した場合

Gは使用する回折格子の溝密度(g/mm)です。

Sはスリット幅(mm)です。

入口スリット [mm]	出口スリット [MM]				
	0.25	0.5	1.25	2.5	5.0
0.25	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
0.5	2.0	2.0	5.0	10.0	20.0
1.25	5.0	5.0	5.0	10.0	20.0
2.5	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0
5.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

表1.6 4nm/mm分散の単一分光器における様々なスリット-スリットの組み合わせのバンドパス(nm単位)。推奨される組み合わせはハイライト表示されています。

したがって、600g/mmのグレーティングを4nm/mm分散のモノクロメーターと1.25mmのスリットで使用した場合、バンドパスは10nmとなります。表1.6に、さまざまなスリットとスリットの組み合わせのバンドパスを示します(分散4nm/mmのモノクロメーターを使用した場合)が、推奨される(入口と出口が同じ)選択を強調しています。

上記の式は、分散が波長に対して一定であり、すべてのスリット幅において完全な線形であるという2つの基本的な仮定に基づいています。また、収差やアライメント誤差により、一般的に小さなスリット幅でのバンドパスが制限されます。このスリット幅が小さいときの限界を、システムの限界光学解像度と呼びます。分光放射照度計の測定は、スリット関数がすべての波長で適度に一定であることを保証するために、一般にシステムの限界光学分解能をはるかに超えるバンドパスで行われます。

スリット関数は、アパーチャーとスリットの組み合わせの相対的なサイズによって変化するため、ミスマッチは(たとえ小さな幅であっても)帯域幅を広げることにつながります。つまり、上記のスリット-スリットの組み合わせの式は、アパーチャー-スリットのサイズには当てはまらないこととなります。表1.7に、さまざまな開口部とスリットの組み合わせのバンド幅を示します(分散が4nm/mmの単一モノクロメーターの場合)が、推奨される構成は強調表示されています。

アパーチャー径 [mm]	出口スリット [mm]				
	0.25	0.5	1.25	2.5	5.0
1.5	3.8	3.6	4.0	7.5	15.0
3.0	7.7	7.6	7.3	1.1	15.0
5.0	13.0	12.9	12.3	12.2	15.0

表1.7 単色光源における様々な開口部とスリットの組み合わせのバンドパス(nm単位)。
4nm/mm分散の単色光源。推奨される組み合わせはハイライト表示されています。

スループットとバンドパス

実用的な測定の最適化には、バンドパスの小ささと信号の大きさのトレードオフが必要になることがよくあります。視野角のような観測すべきパラメータが決まっている場合は、スリットと開口の配置も固定されます。しかし、いくつかの組み合わせが可能であれば、システムを最適化することができます。スリットとアパーチャーが推奨通りにマッチングされ、入口スリット(またはアパーチャー)が均一に照明されていると仮定すると、信号は幅とともに増加します。この増加の大きさは、光源の種類や、スリットとスリットの組み合わせ、またはアパーチャーとスリットの組み合わせによって異なります。タングステンランプのような広帯域光源の場合、スリット幅を2倍にすると、モノクロメーターに入る強度とシステムのバンドパスが共に2倍になり、信号が4倍になります。同じ条件で、アパーチャーとスリットの組み合わせでは、アパーチャーの幅と高さが2倍になるため、8倍になります。水銀灯のような単色光源では、波長成分が1つしかないため、スリットとアパーチャーの組み合わせで2倍、4倍にしかありません。この単色光源と広帯域光源の違いは、蛍光灯などの混合光源でバンドパスを変更するとスペクトルが変化することを説明するものです。この場合、バンドパスを下げると、蛍光体の幅広い発光に比例して、単色線によるピークが非常に「高く」なります。

ダブルモノクロメーターと中間スリット

上記では、シングルモノクロメーターの入射・出射スリットと開口部について説明しましたが、ダブルモノクロメーターの入射・出射スリットと開口部についても説明します。

基本的な原理はダブルモノクロメーターにも当てはまりますが、改良が加えられています。ダブルモノクロメーターは、基本的に2つの同じシングルモノクロメーターが直列に動作し、1つの駆動機構とハウジングを使用するものです。ダブルモノクロメーターは、理論的には、また実際的にも、4つのスリットがあります。より一般的には、一方の出口が他方の入口となるため、入口、中間、出口の3つのスリットが使用されます。ダブルモノクロメーターが加算式か減算式かによって、中間スリットの影響、つまり選択が大きく変わります。

一般に使用されているダブルモノクロメーターの大半は、加算型です。加算型とは、1つ目の分光器で分散された光を、2つ目の分光器でさらに分散させるものです。したがって、単一のモノクロメータの分散が4nm/mmの場合、同じ基本設計の二重加算モノクロメータの分散は2nm/mmになります。表1.6および表1.7を等価な加算式ダブルモノクロメータシステムに使用する場合、計算されるバンドパスは2で割る必要があります。しかし、両方のモノクロメーターコンポーネントが同じドライブとハウジングを共有していても、リンクとギアによって、それぞれのパーツがまったく同じ波長を伝送しないことがあります(これを一般にモノクロメーターの「調整」と呼びます)。これが発生すると、システムのスループットが低下し、この波長の不一致が温度に依存する場合(実際のすべてのシステムと同様)、本質的に不安定であり、分光放射測定には適していません。これを補うのは実はとても簡単で、可能な限り中央のスリットを入口と出口より少なくとも1~2mm大きくすることです。アパーチャーを中間スリットの位置で使用することはありません。

減算型のモノクロメータには、大きく分けて二つの用途があります。1つは、ピコ秒オーダーの超高速測定です。ここで、加算型モノクロメーターを通る経路長の差は、光の速度が有限であるためにパルスを広げる可能性があります。減算型ダブルモノクロメーターは対称に配置されているため、すべての経路で一定の長さを確保することができます。2つ目の用途は、検出器の分光感度などの測定で、より一般的なものです。加法的ダブルモノクロメーターでは、スリットの左右端の波長差が小さいため、ディテクターが均一でないと重大な誤差を生じることがあります。

しかし、減算式ダブルモノクロメーターでは、出射スリットでの残留分散がないため、このような誤差が生じません。これは、第2分光器が、加算方式のようにさらに分散させるのではなく、第1分光器で分散させた光を合成する（ここでは分散の反対）ように動作するためです。つまり、分散は実質的に第1成分のモノクロメータにしか発生せず、スリット関数やバンドパスなどに関しては、このシステムは入口と中間スリットを使った単一のモノクロメータとして扱われるべきです。ただし、2つのコンポーネントの調整は依然として重要であり、出口スリットでは画像の効果的な動きがないため、次のことを行うのが賢明です。

- i. 入り口スリットを出口スリット(または開口部)よりわずかに大きくします。
- ii. 中間スリットを入口スリットよりわずかに大きくします。

これらの条件は、優れた分光放射測定に不可欠な安定性を最適化するためのものですが、最も狭いバンドパスと三角形のスリット機能が損なわれます。三角形のスリット機能が必要な場合は、入口と中間のスリットを等しく選択する必要があります。最も狭いバンドパスも必要な場合は、入口と中間のスリットを出口のスリット/開口部と等しくする必要があります（ただし、このような配置に固有の不安定性に注意してください）。

性能仕様

セクション1.3で分光放射計の各コンポーネントの機能と使用方法を説明しましたが、システムの一般的な仕様と、これらが結果にどのように影響するかを検討する価値があります。

f値

焦点調節システムのf値は、焦点距離を制限絞りで割った値です。したがって、これは、光学系によって取り囲まれる立体角、つまり光学系の「集光力」に反比例します。つまり、F値が小さいほど、モノクロメータのスループットが高くなります。ただし、モノクロメータのf値には実際的な制限があります。理想的な軸外放物面形状の代わりに球面ミラーがモノクロメーターで一般的に使用されるため、3または4未満のf値では、収差がfナンバーの減少の利点を台無しにします。

また、モノクロメータは測定に適したアクセサリと組み合わせて使用することがほとんどで、アクセサリはモノクロメータよりF値が大きく、システム全体が制限されることが一般的です。ほとんどの用途では、F値が4程度のモノクロメータを選択することで最適な妥協点が得られます。

波長精度/分解能/再現性

モノクロメータで波長を選択した場合、実際に透過した波長とコンピュータや波長計が報告する波長との間に差が生じることがあります。必要な波長精度は用途や信号の波長変化の速さによって大きく異なりますが、一般的な光通信用途では、モノクロメータは常に真の波長に対して ± 0.2 nm以内であることが望ましいとされています。現在では、精度を向上させるために多項式フィッティング(三次スプラインとも呼ばれる)を使用しているメーカーもありますので、可能な限りこれを採用すべきです。

スリット幅を小さくしていくと、やがて限界バンドパスに到達します。これがモノクロメータの限界の光学分解能です。分光測定の場合、0.5nm以下のバンドパスを使用することはほとんどありません。これは焦点距離250mmのモノクロメータで容易に達成可能であり、おそらく分光測定の研究室で最も一般的な装置です。蛍光灯のように単色の輝線や吸収線を持つ光源をスキャンする場合、1nm以下のバンドパスで大きな精度が得られます。ただし、このような小さなバンドパスでスキャンする場合、1バンドパスあたり少なくとも2点(できれば5点以上)のデータポイントを取得する必要があることに留意する必要があります。また、線光源の正確な測定には、広帯域光源よりも多くのデータポイントが必要であることを認識する必要があります。

当然ながら、正確な結果を得るためには、モノクロメータは選択されるたびに同じ波長を伝送しなければなりません。実際には、小さな擬似ランダムな変動が見られます。分光測定の信頼性を高めるには、このばらつき(再現性)が約 ± 0.1 nm以下であることが必要です。

バンドパス

分光測定の様々な用途や光源に対応するため、モノクロメータは通常0.5nmから20nm(またはそれ以上)のバンドパスを選択する必要があります。バンドパスはモノクロメータの分散に依存し、4nm/mmの値では0.125mmから5mmのスリットに相当します。

感度とダイナミックレンジ

$V(\lambda)$ 関数の値は、波長によって60倍以上の差があります。光源を正しく表現するために、分光放射計に最低限必要なダイナミックレンジは、この値です。タングステンランプのような広帯域の光源では、広い範囲の信号の測定は必要ないかもしれませんが、赤色LEDのような光源では確実に測定が必要です。例として、830nmで最大強度の発光をするLEDの極端な例を考えてみましょう。830nmの $V(\lambda)$ は 4.52×10^{-7} であり、このLEDの555nmの発光はピーク値の200万倍以上の光量に寄与することになります。もし、測定器のダイナミックレンジがこのレベルの発光を解決できない場合、ユーザーは正確な光量値を提供することができなくなります。これを解決するには、555nmの光をすべて検出できる感度を持ち、なおかつ70倍近く強いピーク強度に対応できる装置でなければなりません。

測定可能な最大の信号と最小の信号の比である測定器のダイナミックレンジは、性能の相対的な尺度で、それ自体が品質を示すものではありません。例えば、上記の例では、830nmの信号が $10^{-7}A$ の場合、それ以上のレンジは無駄であるため、 10^{-10} から $10^{-3}A$ のレンジでは正確な測定ができません。

測定可能な最小の信号は、一般に、デジタル化またはノイズのいずれか大きい方で決定されます。ノイズは信号の時間的なランダムな変化であるのに対し、デジタル化の限界はアナログ-デジタル変換器などの0と1の差(信号の分解能ともよく言われる)です。このノイズは電氣的なものですが、光の等価強度で表現することができます。ノイズ等価パワー(NEP)、ノイズ等価放射照度(NEI)、ノイズ等価ラジアン(s)(NER)など、ほとんどの分光放射照度計で測定可能な最小の信号を指定するために使用されます。

このパラメータは、ダイナミックレンジを絶対値で示すだけでなく、モノクロメータのスループットや検出器、電子回路の品質に依存するため、システム全体の性能を示すものでもあります。ただし、このパラメータは波長や測定条件によって変化するため、2つのメーカーの仕様を比較する際には注意が必要です。

迷光

迷光は、強いスペクトル成分の存在下での弱いスペクトル成分の測定に対する制限と考えることができます。例えば、上記のLEDの例では、迷光レベルが 10^{-4} であった場合、555nmで測定された信号は、830nmでの信号より20~30%だけ低い値となる可能性があります(555nmに光がない場合でも同様)。このような場合、信号はディテクターのノイズ等価入力をはるかに上回り、システムのダイナミックレンジ内にあるにもかかわらず、算出された明所視値は大きな誤差を生じることになります。

すでに指摘したように、多くの明所視アプリケーションでは、正確な結果を得るために 10^{-4} 程度の迷光レベルが必要です。NVISや上記のLEDの例など、一部のアプリケーションでは、これよりもはるかに低い迷光レベルが要求されます。あるいは、紫外線ハザード評価など、他の測定が同じ装置で行われる場合、このような装置の選択が必要になることがあります。このようなより厳しい用途では、迷光レベルが $\leq 10^{-8}$ のダブルモノクロメータが使用されます。

より厳密でない用途では、滞在光の少ないモノクロメータを使用することは常に許容されますが、その逆は決してありません。

スキャン速度

ユーザーがより高速なスキャンを求めるのは不自然なことではありません。しかし、速度と精度の適切なバランスを見出す必要があります。確かに、ブロッキングフィルターを選ばない、ゲインレンジを変えない、積分時間を短くするなどの方法でスキャンを速くすることはできますが、この方法では結果が無意味になる可能性があります。また、スキャンの遅さとシステムの遅さを混同してはなりません。遅い装置でも、高速な装置と同じようにモノクロメータを動かしたり、フィルターやゲインレンジを変えたりできることがよくありますが、その違いは測定にかける時間や手間となります。

安定性

分光放射計が効果的であるためには、校正から測定までの間、安定している必要があります。通常、電子機器に多少のドリフトが生じることが予想されますが、その多くは自己校正や暗レベル減算などのルーチンによって定期的に除去されます。分光放射計の安定性に最も影響を与えるのは、機器の環境と取り扱いです。実際、再校正の間隔は、測定器よりも環境に依存することが多いと考えられます。できるだけ長く校正を維持するために、移動や温度変化は最小限にとどめる必要があります。また、波長とスループットの定期的なチェック(適切な標準光源を使用)を行い、校正係数の変化を追跡し、望ましい精度を維持するために再校正が必要な時期を予測する必要があります。

ソフトウェアと自動化

これは、結果に対して二次的な影響しか与えないという意味で、仕様ではありませんが、現在のシステムで見られる自動化の程度では、測定と計算の方法を使用するのではなく、ソフトウェアが決定することが多くなっています。そのため、使用にあたっては、ソフトウェアが指示する手法が適切であることを確認する必要があります。

分光放射測定システム

分光放射計に不可欠な構成要素については、セクション1.3で説明しました。また、各種光源の分光出力を測定する場合には、入射光線を集めて測定系に伝達するフロントエンドまたは入力光学系が必要となり、分光透過率、分光反射率、ディテクターの分光応答を測定する場合には、入力および出射光学系の両方が必要です。しかし、どのような場合でも、適切な分光放射標準光源を用いて測定システムを適切に校正することは不可欠です。このセクションでは、以下を取り上げます。

1. 各種入出力光学系モジュールの選択と使用。

および

2. 統合された測定システムを校正するための適切な標準の選択と使用。

光源測定/入力光学系/システム校正

分光放射照度・放射束/コサインコレクター

コサインコレクターは、入射角のコサインに従って放射束をサンプリングします。これらのデバイスは、半球全体からの放射を受け止める装置です。

コサインコレクターには、一般的に透過型と反射型の2種類があります。反射型は、コサインの収集量、使用波長範囲ともに圧倒的に優れています。反射型コサインコレクターは、光放射の測定に使用される積分球が主体です。

適切に設計され、コーティングされた積分球(図1.10参照)は、多くの測光、放射、分光放射の測定に非常に有効です。積分球は、さまざまな形状、さまざまなコーティングで得ることができます。優れた積分球の前提条件は、拡散性と高反射性のコーティングです。使用する球の形状やコーティングの種類は、測定用途に依存します。BaSO₄とPTFEベースのコーティングは、可視スペクトルにおいて100%に近い反射率を持っています。

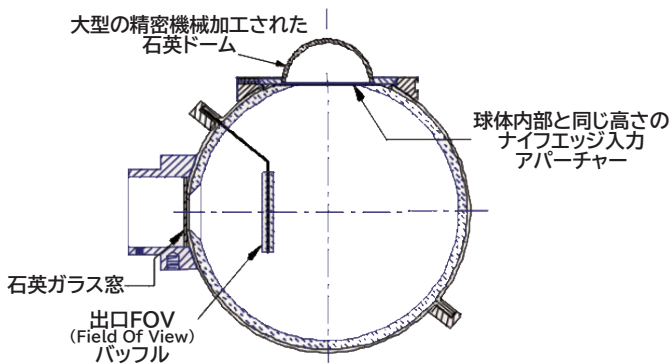


図1.10 積分球コサインリセプター

積分球は、大きな光源や不規則な形状の光源の分光放射照度を測定する場合に特に有効で、太陽光、蛍光灯、その他の大面積または広範囲に及ぶ光源の放射照度を測定する場合には不可欠なものです。積分球は、発散・拡散放射する光源の光束、放射束、分光放射束を測定する場合にも非常に有効です。このような場合、光源から放射されるすべての光束は、積分球の入口ポートで収集されなければなりません。図1.11に、二重回折格子型分光器の入口スリットに取り付けられた積分球コサインコレクターを示します。

積分球を入力とする分光放射計の校正は、分光放射照度の標準値を用いて行われます。セクション3.1で述べた分光放射照度の「プラグイン/プリアライメント」標準は、特にこの用途に適しています。システムの分光放射照度応答関数 $\psi(\lambda)$ は、次の関係から決定されます。

$$\psi(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{s(\lambda)}$$

ここで、 $E(\lambda)$ = 校正用標準光源の分光放射照度

$s(\lambda)$ = 各波長におけるディテクター信号

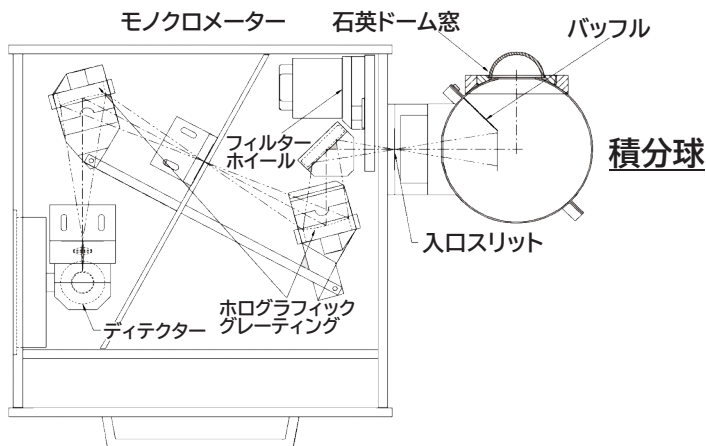


図1.11 積分球コサインリセプターを備えた分光放射計

分光放射照度計は、対象となる波長域の分光放射照度応答が校正されると、次の関係式を用いて試験光源の分光放射照度 $E^t(\lambda)$ を測定することができます。

$$E^t(\lambda) = \Psi(\lambda) \cdot s^t(\lambda)$$

ここで、 $s^t(\lambda)$ =受光素子
各波長における信号

このシステムの分光放射照度応答校正係数は、校正係数に積分球の入射口の面積を乗じるだけで、分光放射照度に変換することができます。このように、光源から放射されるすべての光束が積分球に集められれば、分光放射照度計は光源の分光放射パワーの測定に使用できるようになります。

分光放射照度／無入力光学系

ある種の測定条件下では、特別な入力光学系を必要としません。例えば、点光源や平行光源の分光放射照度を測定する場合、分光放射計がモノクロメーター（または他の光学分散素子）で光源が差し引く角度フィールドに均一に応答する場合は、入力光学系は必要ありません。モノクロメーターの空間透過率とディテクターの検出領域の均一性は、分光放射計の全体的な空間均一性に寄与しています。

分光放射照度応答の入力光学系を持たない分光放射照度計は、分光放射照度の1000W、200Wまたは45Wランプ標準を使用して校正することができます。光源と分光器の距離が比較的短く、光源が点光源に近似していないため、この場合、「プラグイン／事前調整」標準光源の使用は推奨されません。

分光放射輝度/FOVバッフルアタッチメント

図1.12に示すように、視野バッフルアタッチメントは、ディテクターまたは分光器の受光角を制限する機械的な装置です。そのため、視野バッフルアタッチメントはモノクロメータよりも大きなfナンバーを持つ必要があります。

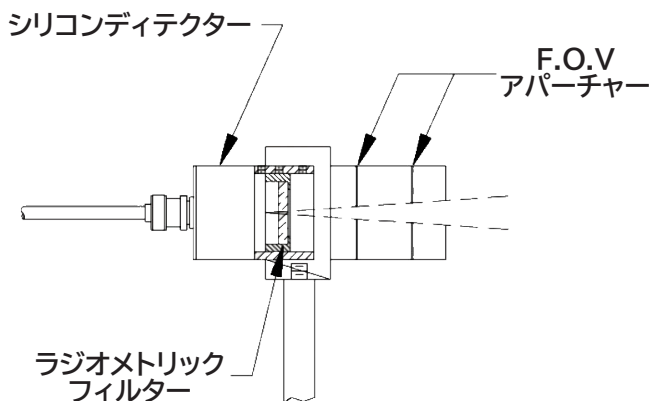


図1.12 視野角バッフルアタッチメント

このようなバッフルにより、分光放射計は大面積で均一に放射される光源の分光放射輝度を測定することができます。光源は、アタッチメントのFOVをオーバーフィルする必要があります。モノクロメータの入り口スリットから光源までの距離は、光源がこのオーバーフィル条件を維持している限り、可視スペクトルでの測定では重要ではありません。適切な積分球校正標準光源を使用して、分光放射輝度応答のシステムを校正する必要があります。

分光放射輝度、放射強度、放射照度／テレスコープ

テレスコープ入力光学系は、測定システムから大きく離れた場所にある光源を測定する場合に使用されます。分光放射計を遠隔分光放射計にするための光学部品です。

望遠鏡を使用することにより、分光放射強度、分光放射照度、分光放射照度を測定することができます。

分光放射強度や分光放射照度を望遠鏡付き分光放射計で測定する場合、測定する光源は望遠鏡の視野を下回ることが必要です。一方、分光放射輝度を測定する場合、被測定光源は望遠鏡の視野をオーバーフィルする必要があります。一般に、分光放射輝度の測定において、分光放射計から光源までの距離を知ることは必須ではありません。ただし、分光放射照度や放射強度応答の校正を行う場合は、校正用光源から分光放射照度計までの距離を正確に把握しておく必要があります。

分光放射照度計の校正は、1000W、200W、45Wのランプ標準光源を測定系から所定の距離に配置することで行うことができます。この距離は、望遠鏡の光学特性によって異なります。分光放射照度標準は、分光放射照度に距離の2乗を乗じるだけで分光放射照度に変換できるため、分光放射強度応答のための遠隔分光放射計の校正にも使用することができます。

分光放射輝度応答のための望遠鏡付分光放射計の校正は、積分球校正標準光源を用いて行うことができます。ただし、前述のように校正用標準光源の放射面積が望遠鏡の視野をオーバーしている必要があります。

分光放射輝度／マイクロ望遠鏡

モノクロメーターの入射口にマイクロ望遠鏡を取り付けると、マイクロ分光放射計に早変わりします。これにより、小さな放射光源の分光放射輝度を測定することができます。モノクロメーターの入射口に光源を正しく結像させるためには、マイクロ望遠鏡の視野系が正確であることが重要です。一般に、マイクロ望遠鏡入力光学系を使用する場合、モノクロメーターの入口スリットを小さな円形の入口開口部に置き換えます。

マイクロ望遠鏡入力光学系は、様々な光学系や対物レンズで得ることができます。分光放射照度計の校正は、積分球校正標準光源を用いれば容易に行えますが、他の光源では均一性、作動距離の関係で困難な場合があります。

分光放射照度・輝度/光ファイバークローブ

光ファイバークローブは、モノクロメーターに直接結合することもできます。光源に対する測定器の位置決めやアライメントが困難な場合に特に有効です。プローブは、入力光学機器を追加せずに使用することもできますし、積分球(分光放射照度または分光放射照度測定用)、望遠鏡(分光放射照度、分光放射強度測定用)、顕微鏡(分光放射照度測定用)などの入力光学機器と組み合わせて使用することもできます。顕微鏡を使用する場合、図1.13に示すように光ファイバークローブを用いて顕微鏡とモノクロメーターを接続するのが一般的です。

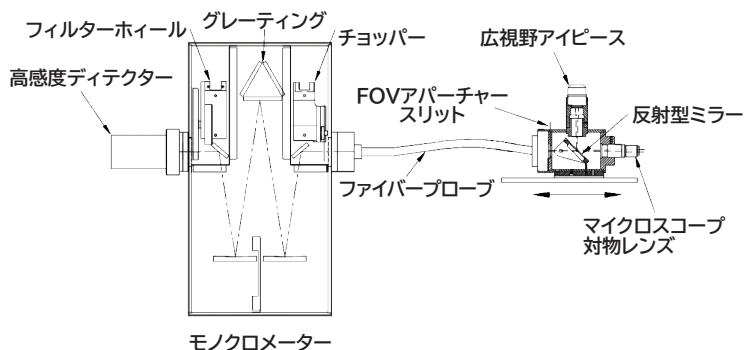


図1.13 光ファイバークローブと顕微鏡入力光学系を備えた分光放射計

入力光学系がファイバークローブを介してモノクロメーターに結合されているすべての場合において、適切な校正源は、さまざまな入力光学系モジュールに対して上で推奨されたものと同じものです。

分光放射輝度/結像光学系

モノクロメーターの入射口に光源を結像させるために、レンズやミラーで構成された比較的簡単な結像光学系を使用することができます。結像光学系に視野系がない場合は、モノクロメーターの入射口にシャープな像が目視で確認できるまで光源または測定器の位置を調整する必要があります。結像光学系は、分光放射輝度を測定する際に使用されます。分光放射輝度のタングステンリボンフィラメントランプ標準光源(セクション3.3に記述)または積分球校正標準光源のいずれかを使用して、分光放射輝度応答の測定システムを校正することができます。

分光透過率

通常の分光透過率測定は比較的簡単です。分光透過率の測定は、モノクロメーターの入射スリットに光源を垂直に置き、光路に被測定物がある場合とない場合のディテクター信号を記録する最も簡単な方法です。この信号の比が、モノクロメーターの波長設定における被測定物の正規の透過率です。

分光透過率測定に特化した装置を分光光度計と呼びます。分光光度計は一般に、すべての主要部品が単一の筐体に収められており、光学設計には「ダブルビーム」が採用されていることが多いです。ダブルビーム分光光度計は、光源を2つの光路に分割し、ディテクターで再結合させます。測定する試料は一方の光路に挿入され、信号検出系は「100%」信号に対する「テスト」信号の比率を測定します。0.01%までの分光透過率を測定できる分光光度計は容易に入手できますが、分光光度計の汎用性は制限されます。多くの分光光度計が透過率と反射率の測定に限定されているのに対し、設計の優れた分光放射計は、光源の分光出力やディテクターの分光感度、分光透過率(通常と拡散の両方)、分光反射率(鏡面と拡散の両方)の測定を行うことができるように構成されています。

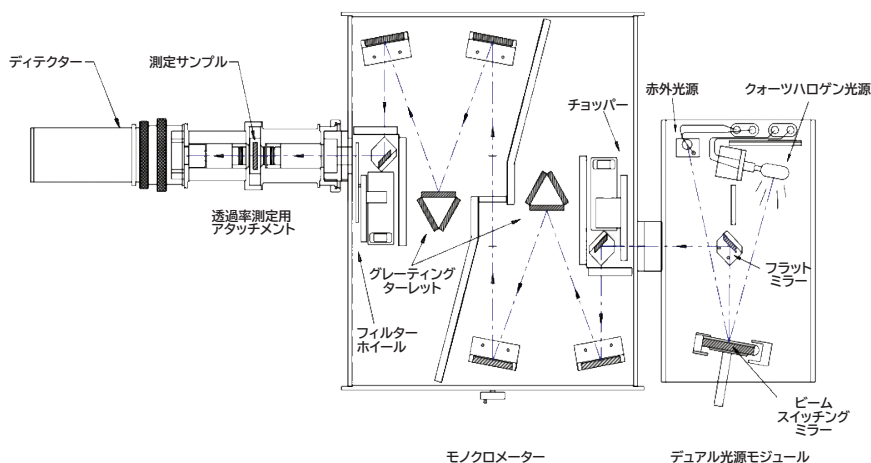


図1.14 通常の分光透過率を測定するために構成された分光放射計

物体の分光透過率は、放射束の性質に依存します。すなわち、透過率は入射角、偏光、温度などに影響されます。また、蛍光の影響も考慮する必要があります。最も高い精度で測定するためには、その物体が使用されるのと全く同じ方法で透過率を測定することが望ましいです。これは、より柔軟性のある分光放射計を使用することでより実現可能です。分光放射計を透過率測定に使用する場合、光源モジュールと透過率測定用アタッチメントが必要です。分光放射計は汎用性が高いため、試料の広帯域(白色光)照明や単色照明用にシステムを構成することができます。図1.14は、試料に単色光束を入射して通常の分光透過率を測定するように構成された分光放射計を示しています。

拡散透過率では、すべての透過放射束を集めるために、図 1.15 に示すような積分球のアタッチメントが必要です。この設計は、ダブルビーム分光光度計でうまく機能します。このアタッチメントの改良版は、分光放射計の入力または出力に使用することができます。このアタッチメントで行う透過率測定は、全スペクトル透過率(通常と拡散の合計)を測定します。

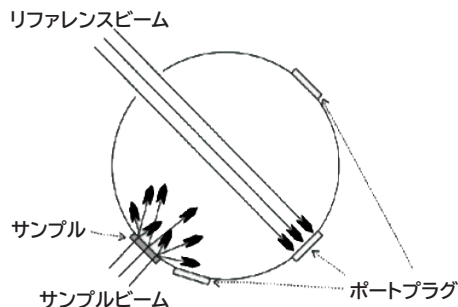


図1.15 拡散透過率測定用積分球アタッチメントの構成要素

分光反射率

物体の分光反射率は、放射束の性質にも依存し、入射光束が広帯域か単色かが特に重要です。広帯域の光束を照射した場合、蛍光が発生することがよくあります。入射光束が単色であれば、蛍光の影響はなくなります。多くの場合、特定の光源が照射されたときの物体の反射率が必要とされます。分光透過率測定と同様に、分光放射計にも光源モジュールと反射率測定用アタッチメントがあり、測定条件に合わせて構成することができます。

単色入射フラックスによる鏡面反射率

図1.16は、試料に単色光束を入射させ、入射角の関数として分光鏡面反射率を測定するように構成された分光放射計システムの光学レイアウトを示します。この場合、デュアル光源モジュールは、ダブルグレーティングモノクロメーターの入力に取り付けられています。モノクロメーターの出口ポートには、角度可変の全鏡式鏡面反射アタッチメントが装着されています。この設計の重要な特長は、「自己校正」機能です。補助標準器(校正済みミラー)を使用することなく、正確な測定を行うことができます。フレキシブルな設計により、ディテクターを入射角0の位置にセットし、100%の読み取りを行うことができます。その後、さまざまな入射角の鏡面反射率測定が可能です。

広帯域入射フラックスによる鏡面反射率

広帯域の光束が試料に入射する分光鏡面反射率の測定は、反射率計を光源モジュールとモノクロメーターの間に取り付けるだけで可能です。この測定では、ディテクターをモノクロメーターの出口ポートに取り付け、光ファイバプローブで反射率アタッチメントをモノクロメーターの入口ポートに結合しています。

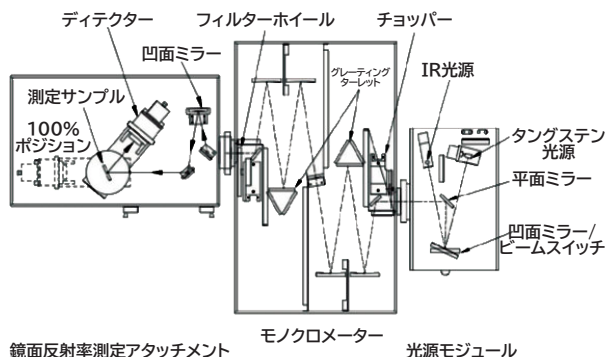


図1.16 単色入射光束で鏡面反射率を測定するための分光放射計構成

単色入射光束による拡散反射率

図1.17は、単色入射光束の拡散反射率を測定するために構成された分光放射測定システムの光学レイアウトを示すものです。積分球反射率計は、自動または手動で制御される光ビーム切り替えミラーを備えた、正確なダブルビーム設計を採用しています。このダブルビーム設計により、より正確な拡散反射率測定法である「比較法」が可能になります。

このバージョンでは、積分球の入口ポートの前にサンプルコンパートメントがあり、通常のサンプルや拡散透過するサンプルの透過率を測定することが可能です。また、取り外し可能な鏡面ライトトラップにより、鏡面部材の有無にかかわらず、拡散反射率測定が可能です。また、光学設計により、一定の入射角で鏡面反射率を測定することができます。最高の精度を得るためには、可視スペクトルでの拡散反射率測定を行う際に、校正済みの拡散反射率プラークを参照標準として使用する必要があります。PTFEでコーティングされたプラークは、一般的に他のコーティングよりも優れていると考えられています。PTFEは、可視光線領域で99%以上の反射率を持つ、拡散反射型の表面を持っています。

広帯域入射光束による拡散反射率

積分球反射率計を光源モジュールとモノクロメーターの間に取り付けるだけで、広帯域光束入射時の分光拡散反射率を測定することができます。これらの測定では、ディテクターをモノクロメーターの出口ポートに取り付け、光ファイバープローブで反射率アタッチメントをモノクロメーターの入口ポートに結合することになりました。

分光応答性

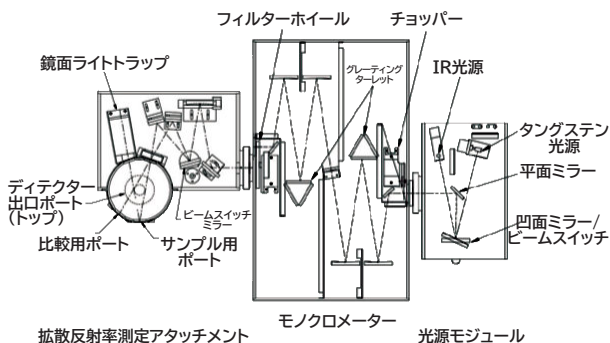


図1.17 単色入射光束で拡散反射率を測定するための分光放射計の構成図

図1.18は、ディテクターの分光応答を測定するために構成された分光放射計システムの光学レイアウトを示したものです。この場合、入力光学系は、ダブルグレーティングモノクロメーターの入口ポートに取り付けられた光源モジュールと、モノクロメーターの出口ポートに取り付けられた反射型コリメート出口光学系モジュールで構成されています。ディテクター（標準またはテスト）は、出口光学系モジュールに取り付けられています。ディテクターのパワーや放射照度の測定は、2つのステップで行われます。

まず、標準ディテクターをコリメートされたビーム内に配置し、単色光束または放射照度を測定します。単色光束は、以下の計算から求めることができます。

$$\Phi(\lambda) = \frac{S^s(\lambda)}{R^s(\lambda)}$$

ここで、 $R^s(\lambda)$ = 標準ディテクターの分光パワーレスポンス
 $S^s(\lambda)$ = 各波長における標準ディテクター信号

標準ディテクターを試験ディテクターに置き換え、試験ディテクターの分光パワー応答 $R^t(\lambda)$ から決定します。

$$R^t = \Phi(\lambda) \cdot S^t(\lambda)$$

ここで、 $S^t(\lambda)$ = 指定波長における試験ディテクター信号

放射照度応答は、ディテクター全体(標準と試験の両方)に均一に照射し、電力応答とは対照的に標準ディテクターの放射照度応答を計算に使用することを除いて、電力応答と同じ方法で測定されます。

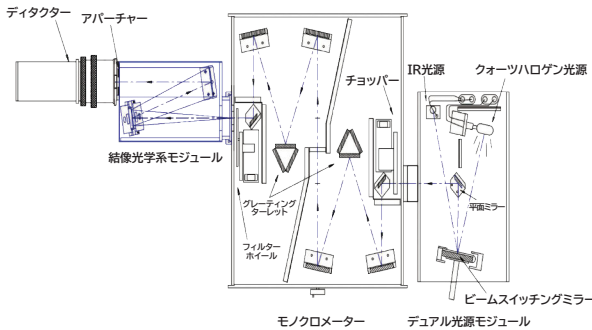


図1.18ディテクターの分光感度測定用に構成された分光放射計

可視スペクトルの測定には、一般的にNIST準拠の標準シリコンディテクターが使用されます。ほとんどのシリコンディテクターは可視スペクトルにおいて感度が非常に均一であり、多くの場合、標準ディテクターの面積は正確に1cm²であるため、パワー応答(単位:A W⁻¹)と放射照度応答(単位:A W⁻¹ cm²)は同一です。可視スペクトルの単色光束や放射照度を測定する際の一般的な不確かさは、1%のオーダーです。

測光パラメータと測色パラメータの計算

三刺激値

色度値は、光源(ラジオメトリック単位のデータファイル)またはオブジェクト(分数透過率または反射率のデータファイル)に対して計算することができます。オブジェクトの場合、値は標準的な照度(A、B、C、D65など)の下で見たときの色を表します。

光源色

光源のX、Y、Z三刺激値は、CIE1931分光三刺激値、 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ を用いて右のように算出されます。

$$X = \sum_{\lambda=380}^{780} \bar{E}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Y = \sum_{\lambda=380}^{780} \bar{E}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Z = \sum_{\lambda=380}^{780} \bar{E}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

ここで $\bar{E}(\lambda)$ = データファイルの分光値
 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ = CIE 1931 分光三刺激値
 $\Delta\lambda$ = データファイルの波長間隔[nm]です。

物体色

物体のX、Y、Zの三刺激値は、CIE1931分光三刺激値を用いて右のように算出されます。

$$X = k \sum_{\lambda=380}^{780} \bar{E}(\lambda) \Gamma(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Y = k \sum_{\lambda=380}^{780} \bar{E}(\lambda) \Gamma(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Z = k \sum_{\lambda=380}^{780} \bar{E}(\lambda) \Gamma(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は以下のようになります。

ここで、 \bar{E} = 光源の相対分光パワー

$\Gamma(\lambda)$ = 分光反射率または分光透過率データ

$$k = \frac{100}{\sum \bar{E}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda}$$

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ = CIE1931分光三刺激値

$\Delta\lambda$ = データファイルの波長間隔 [nm]

上記の式で使用されている $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ の値は、2°視野です。

10°視野の場合の等価な X_{10} 、 Y_{10} 、 Z_{10} 値は、CIE1964補足分光三刺激値を使用して同様に計算することができます。

測光出力計算

光源については、測光出力(この場合は照度、 E_v)は次のように計算されます。

$$E_v [\text{lm cm}^{-2}] = Y [\text{W cm}^{-2}] \cdot 683 [\text{lm W}^{-1}]$$

物体の場合、Yの値はパーセントで表され、光透過率または反射率です。

CIE1931色度

データファイルの x 、 y 、 z 色度座標は、三刺激値 X 、 Y 、 Z から右のように計算されます。

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

UCS1976 u 、 v 、 u' 、 v' 座標

UCS1960 u 、 v 座標計算

$$v = \frac{6y}{12y - 2x + 3} = \frac{2}{3} v'$$

$$u = \frac{4x}{12y - 2x + 3} = u'$$

UCS1976 u および v 座標計算

$$u' = \frac{4x}{12y - 2x + 3} = u$$

$$v' = \frac{9y}{12y - 2x + 3} = \frac{3}{2} v$$

相関色温度

相関色温度の計算は、30本の等温線の表を使ったロバートソンの方法に基づいています。ロバートソンの逐次近似法は、相関色温度を $0.1 \mu\text{rd}$ (マイクロ逆数度、 $\mu\text{rd} = 106/T$ 、 T はケルビンの温度) 以内で正確に計算できるはずですが、1600Kから3000Kまでの最大誤差は、0.2K+測定不確かさ未満でなければなりません。ロバートソンは、黒体軌跡から0.01より遠い色度の光源では、誤差が大きくなる可能性があるとして述べています。しかし、相関色温度という概念は、黒体軌跡のすぐ近く以外ではほとんど意味をなしません。

CIE LAB/ LUV色空間

CIE LAB色空間の計算は、推奨される1976年のCIE公式に従って行われます。光源の計算では、 X 、 Y 、 Z は、 $Y=100$ となるように均等に正規化されます。式は右の通りです。

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right]$$

ここで、 X_n 、 Y_n 、 Z_n は基準白の三刺激値です。 X/X_n 、 Y/Y_n 、 Z/Z_n が0.01より小さい場合、この式はわずかに修正されます。

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right]$$

修正した式は右の通りです。

$$L^* = 116 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \left(\frac{16}{116}\right) \right]$$

ここで、 Y/Y_n が0.008856より大きい場合は
 $f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}$ 、 Y/Y_n が0.008856
以下の場合は $f(Y/Y_n) = 7.787(Y/Y_n) + 16/116$ 、
 $f(X/X_n)$ と $f(Z/Z_n)$ は同様に定義します。

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \right]$$

$$\begin{aligned} u^* &= 13L^*(u' - u_n') \\ v^* &= 13L^*(v' - v_n') \end{aligned}$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \right]$$

光源については、理想的な白色物体に対する標準的な照度との比較を示す値です。
物体については、与えられた標準的な照度の下での理想的な白色物体との比較を示す値です。

色差と演色評価数

色差や演色評価数の詳細な計算については、本セクションの範囲外ですが、別のところで検討されています。しかし、これらはランプの性能の指標として日常的に商業的に使用されており、その意義について簡単に説明します。

2つの光源は、同じ色度や相関する色温度を持ちながら、分光分布的に異なる場合があります。そのため、透過光や反射光をこれらの光源で見た場合、光源ごとに異なる色度が生じる可能性があります。色度の違いは、通常、ある均一な色空間 (Lab、Luv、CIE 1964 WUVなど) で計算されます。任意の光源と基準光源との間の一致度 (パーセントで表される) を演色性と呼びます。

CIEは、光源の演色性を評価するための標準的な方法を規定しています。この方法は、一連の「特殊演色評価数」と平均的な「一般演色評価数」で構成されています。各特定演色評価指標は、試験光源と基準光源下での14の特定サンプルの色度間のCIE1964色差を表しています。これらの特殊演色評価数のうち最初の8つを平均化したものが一般演色評価数です。一般演色評価数が100%に近いほど、その試験光源は基準光源に近いと考えられます。

ディテクター測光パラメーター

CIEによって規定されたいくつかの測光パラメータは、ディテクターの性能を反映するために使用することができます。基本的にこれらの値は、ディテクターの応答とCIE標準観察者の間の一致を表しています。これらのパラメータのうち、最も頻繁に引用され、測定されるのは、 f_1' 値です。このパラメータは、特定の波長における精度ではなく、全体的な「適合度」を表し、次の式で与えられます。

$$f_1' = \frac{\int |\bar{R}(\lambda) - V(\lambda)|}{\int V(\lambda)} \cdot 100 \quad [\%]$$

ここで $R(\lambda)$ はディテクターの応答、 $V(\lambda)$ はCIE標準観察者の応答です。このパラメータはパーセントで表され、値が小さいほど標準観察者への適合が良いことを示します。この値がゼロに近づくと、ある分光分布の光源で校正し、別の分光分布の光源を測定することによって生じる誤差は急速に減少します。しかし、経験豊富なユーザーの多くは、校正とテスト光源がかなり異なる場合、2%以内の適合が必要であることに同意しています。これは一般に、フィルタリングされていないディテクターの応答を測定し、それに合うようにフィルターを「調整」することによってのみ達成可能です。要求の少ないアプリケーションでは、一般に5%以下の値が許容されます。

測光計算と測色計算の使用限界

相関色温度や演色評価数などの依存パラメータを計算する場合、これらは黒体または類似の分光分布を仮定していることに留意する必要があります。一般に使用されている多くの光源、例えば蛍光灯やLEDは、黒体とは全く異なる分光分布を持っています。結果は得られるかもしれませんが、実際、照明業界では光源の特性評価にこれらのパラメータを使用することが多いのですが、結果は慎重に解釈する必要があります。

精度およびエラー

ランダムエラー、システムティックエラー、ピリオディックエラー

これら3種類の誤差は、あらゆる測定の精度を制限する基本的な要素です。それぞれは少なくとも理論的には区別され、分離可能ですが、実際の状況では、これらを互いに分離するために膨大な作業が必要です。

図1.19は、これらの基本的な誤差の種類を示したものです。

ランダム誤差とは、十分にサンプリングされた場合、ガウス関数またはその他の類似の統計関数を形成する平均値に関する変動です。これらの誤差は、積分時間を長くしたり、複数回のスキャンを行うなどして、サンプリングを増やすと減少します。

系統誤差とは、「真の」値に対するオフセットのことです。これらは定義上、一定であり、複数回のサンプリングによって変化することはありません。これらの誤差は、基本的な仮定が実際には実現されていないことが原因であることが多いです。

周期的な誤差とは、周期的または擬似的な事象から生じる誤差のことです。例えば、空調による局所温度の変化や、電源やライン電圧からのAC干渉による変動が挙げられます。

これらの異なるタイプの誤差の統計的分布を図1.20に示します。

測定の精度を指定する場合、これらの個々の誤差を推定して組み合わせる必要があります。ほとんどの標準研究所では、誤差を2または3標準偏差(それぞれ約95%または99%の信頼水準)と見積もっていますが、このように表現すると、1種類の誤差(ランダム)しか意味を持たないため、この値の解釈はユーザーにとって難しいかもしれません。

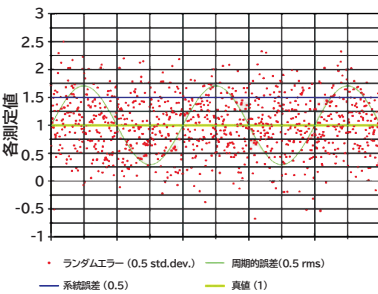


図1.19 測定における誤差の種類

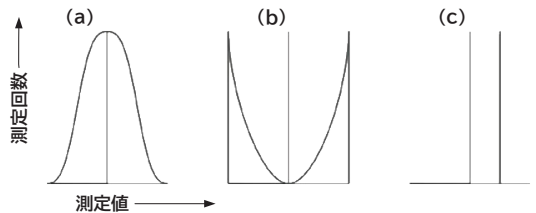


図1.20 中央の真値についての統計分布

a) ランダムエラー、b) 単純な周期的な誤差、c) システムエラー

エラーの原因 測光と分光放射測定

これらの誤差が実際の測定に与える影響を説明するために、ある特定の距離の光源からの照度を測定するために光度計を使用することを考えます。この測定では、次のようなことが予想されます。

ランダムノイズ:

- ・ デテクター
- ・ エレクトロニクス
- ・ 光源

系統誤差:

- 距離の測定
- 校正光源に関連するエラーを含む、光度計の校正係数のエラー
- 光の非余弦収集
- デテクターの相対分光応答と $V(\lambda)$ 関数の違い
- 校正光源の分光分布とテスト光源の分光分布の違い
- 壁や物体からの反射による迷光、その他の光源からの放射。コンピューター画面
- 強度によるデテクター/増幅器の組み合わせの非線形性
- システムの真のダークレベル(つまり、ダークノイズの平均)の設定に関連するエラー

定期的なエラー:

- 光度計の応答と分光特性、または光源の強度に影響を与える温度、湿度、空気の動きの変化
- デテクター/増幅器のゼロレベルまたはゲインのドリフト
- 物体や人員の移動、コンピューター画面表示の変更、実験室への日光の「漏れ」による迷光の変化
- AC電源を測定するとき、またはACの「ピックアップ」が大きい場合のサンプリングエラーと「うなり」

上記のリストから明らかのように、いくつかの測定値の間で結果の厳密な一致が得られたからといって、それが正確であることを意味するわけではありません。結果の正確さに対する信頼は、エラーのすべての原因が最小限に抑えられ、可能な場合は排除された場合にのみ達成されます。分光放射測定では、上記の誤差の原因の多くがある程度示されます。ただし、次の理由により、分光放射分析結果の精度は一般的にはるかに優れています。

- 分光には多くのデータポイントが含まれます。セクション1.6で説明した積分の計算は、 $V(\lambda)$ 関数に比例して各データポイントに関連するエラーの寄与を効果的に減らし、複数のサンプリングとほぼ同じ方法でノイズを統合します。
- $V(\lambda)$ 関数に測光器の応答を合わせる系統的な誤差は、広帯域測定の精度に対する最大の限界となることがあります。

分光放射分析システムでは、実際の $V(\lambda)$ 関数が計算に使用されるため、「理想的な」光度計を表していると思えます。

- 校正光源とテスト光源の分光分布の違いは決定されているため関係ありません。
- 測定全体ではなく、測定の各波長でオートレンジを実行できるため、光源がより正確に表現され、エラーが最小限に抑えられ、ダイナミックレンジが拡張されます。

引用文献および参考文献

- Boyd, R.W., Radiometry and the Detection of Optical Radiation, New York, John Wiley & Sons, 1983, ch. 6, pp. 95-97.
- Cromer, C.L., "A New Spectral Response Calibration Method using a Silicon photodiode Trap Detector," to be published in the Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology.
- DeVos, J.C., Physica 20, pp. 669 (1954).
- Eckerle, K.L., Hsia, J.J., Mielenz, K.D., and Weidner, V.R., Regular Spectral Transmittance, NBS Special Publication 250-6, (1987).
- Eppeldauer, G., and Hardis, J.E., Applied Optics 30, pp.3091-3099 (1991)
- Gouff, A., Revue d'Optique 24, pp. 1 (1945)
- Grum, F., and Bartleson, C. J., Optical Radiation Measurements Volume 2, New York: Academic Press, 1980, ch. 3, pp. 134-142.
- Grum, F., and Becherer R.J., Optical Radiation Measurements, Volume 1, New York: Academic Press, 1979, ch. 2, pp. 12-13.
- Hecht, E., and Zajac, A., Optics, Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1974, ch. 4, pp. 62-63.
- Kirchoff, G., Philosophical Magazine and Journal of Science 4th Series 20, No. 130, (1860).
- Kostkowski, H.J., Erminy, D.E., Hattenburg, A.T., Advances in Geophysics 14, pp. 111-127 (1970).
- "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources", CIE publication number 13.3, 1995
- "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Sources", CIE publication number 13.2, 1974
- "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Sources, 2nd. Ed.(corrected)", CIE publication number 13.2, 1988
- Mielenz, K.D., Saunders, R.D., Parr, A.C., Hsia, J.J., J. Res. National Institute of Standards Technology 95, pp. 621 (1990).
- Robertson, A. R., J. Opt. Soc. Am. 58, pp. 1528 (1968)
- Saunders, R.D., and Shumaker, J.B., The 1973 NBS Scale of Spectral Irradiance, NBS Technology Note 594-13, (1977)

Schneider, W.E., Lasers and Optronics 12, No. 1, pp. 29 -32 (1993).

Schneider, W.E., "Spectral Ultraviolet Measurements and Utilization of Standards," Presented at the Critical Issues in Air Ultraviolet Metrology Workshop at NIST, Gaithersburg, MD, May 25-26 (1994).

Schneider, W.E., Test and Measurement World 6, pp.159-169(1985).

Schneider, W.E., and Goebel, D.G., The International Journal for Optical Engineering Proceedings 262, pp. 74-83 (1981).

Schneider, W.E., and Goebel, D.G., Laser Focus/Electro-Optics 20, No. 9, pp. 82-96 (1984).

Schneider, W.E., and Miller, K.A., The Photonics Design & Application Handbook, 41st Ed., Pittsfield, MA: Laurin Publishing Co., 1995 pp.36-44.

Stair, R., Johnston, R.G., and Halbach, E.W., NBS Journal of Res. 64A, pp.291-296, (1960).

Stair, R., Schneider, W.E., and Jackson, J.K., Application Optics 2, pp.1151-1154, (1963).

Smith, W.J., Modern Optical Engineering, 2nd Ed., New York: McGraw-Hill, Inc., 1990, ch. 8, pp. 217

Walker, J.H., Saunders, R.D., and Hattenburg, A.T., Spectral Radiance Calibrations, NBS Special Publication 250-1, (1987)

Walker, J.H., Saunders, R.D., Jackson, J.K., and McSparren, D. A., Spectral Irradiance Calibrations, NBS Special Publication 250-20, (1987).

Wolfe, W.L., and Zissis, C.J., The Infrared Handbook, Revised Ed., Washington D.C.: Office of Naval Research, Dept. Of The Navy, 19, ch.1, pp. 29.

Young, R., and Schneider, W.E., Laser Focus World 31, No. 5, pp. 215-220 (1995).

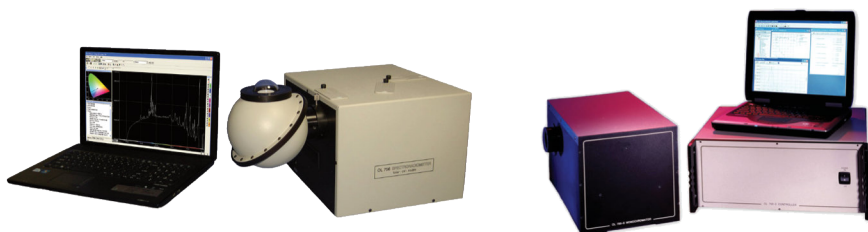
Zalewski, E.F., The NBS Photodetector Spectral Response Calibrations Transfer Program, NBS Special Publication 250-17, (1988).

Zalewski, E.F., and Duda, C.R., Applied Optics 22, pp. 2867-2873 (1983). Zappa, F., Lacaíta, A. L., Cova, S. D., Lovati, P., Opt. Eng. 35, No. 4, pp. 938-945 (1996).

OPTRONIC[®]

LABORATORIES

Optronic Laboratories, LLC は、高性能な光放射測定システム、積分球光源、校正標準光源、サービスを設計・製造し、世界の光測定方法を改善します。NVIS互換性測定、自動車および商業製品のディスプレイ試験、LED、照明器具、光生物学的危険性試験などの分野に重点を置いています。



IMPROVING THE WAY THE WORLD MEASURES LIGHT!



航空宇宙/防衛



LED/照明



ディスプレイ



園芸



医療



自動車関連



計測学



研究開発