

光電素子の相対分光応答度測定方法

受光器分光応答度測定方法に関する研究調査委員会報告書

平成9年3月

社団法人 照明学会

ま え が き

受光器の分光応答度は受光器の最も重要な特性で、測光・測色の確かさを決める基本的な量であることはよく知られている。しかし、その測定方法は、同じ分光測定技術である光源の分光分布測定に比べて、体系化が立ち後れており、規準となるべきものが定まっていない。すなわち、光源の分光分布測定については、JIS Z 8724「光源色の測定方法」や照明学会技術基準 JIEC-002「分光測光による測光標準用放電ランプの全光束測定方法」が定められて、それらをガイドとして、規約化された普遍性のある測定結果が得られるようになっている。それに対して、受光器の分光応答度測定については、JIS C 1609「照度計」のなかで簡単に触れられているのみであった。このような立ち後れの原因には、トレーサビリティ体系に乗った分光応答度の標準器の供給が遅れていた事情も絡んでいた。しかし、近年、波長 250~1150 nm での分光応答度標準が電子技術総合研究所から供給されるようになり、この問題は解決した。そこで、照明学会では、平成 6 年度から、受光器の分光応答度測定に関する研究調査委員会を発足させて、測定の規準作成作業を行ってきた。本報告書は、この委員会の研究成果であって、これを学会規準として登録し、広く一般の利用に供する予定である。

本報告書の内容は、その形態を JIS に準ずるものとして、本体（本文）、付属書、参考、解説に分け、まず、本体では光電検出素子単体及び受光器ヘッド（例えば照度計の受光部）の分光応答度測定方法とその関連事項を述べる。付属書は 2 部に分れ、その 1 では、輝度計のような結像光学系を持った受光器の測定方法を規定し、その 2 では、分光測定の実施に際して迷光による誤差の要因となる光学材料（特に黒色面）の分光反射特性、測定に使用するフィルタなどの蛍光発生についての調査・実測データを示す。参考では、光電素子、フィルタ、拡散面などを一体化した状態で測定した分光応答度の値と、これらの構成要素をそれぞれ単独で測定した値を掛け合わせて計算した合成値の比較を、種々の実測例について示している。これは、測定器の性能や検出器の特性から一体化した状態での測定が困難な場合にとる対策への指針を与えるものである。なお、主として本体について、規定した事項や方法などについて周辺の事項や背景などを含めた解説を本体の後に付け加えることとした。

この作業を行った委員会は、平成 6 年 5 月から平成 9 年 3 月まで計 16 回開催され、提出された資料は総計 122 件に達し、全期間を通しての委員の出席率は 94% であった。これは、当委員会のテーマ及び審議、検討した内容に対する各委員の熱意及び関連産業界等の関心の高さを示している。また、委員会活動の一環として、委員が所属する照度計などの製作・認定を行っているメーカ等の機関の相互間で、照度計の相対分光応答度の相互比較を行い、照度計の相対分光応答度測定の技術、目盛精度は、工業レベルで満足すべき一致が得られていることを確認した。なおこの相互比較の結果については、別途学会誌等に発表する予定である。

委員会の構成は下記のとおりである。

委員長	中川 靖夫	(埼 玉 大 学)
幹事	大谷 文雄	(埼 玉 大 学)
幹事	戸 沢 均	(株) ト プ コ ン)
委員	大久保 和明	(松下電器産業 (株))
委員	大 倉 力	(株) オプトリサーチ)
委員	口 武 夫	(株) モ リ リ カ)
委員	片岡 敏久	(日 置 電 機 (株)) 平成6年度
委員	小林 健二	(日 置 電 機 (株)) 平成7, 8年度
委員	越 裕之	(株) 日 立 製 作 所)
委員	近 藤 久男	(東芝ライテック (株))
委員	斎 藤 一 朗	(電子技術総合研究所)
委員	佐々木 政子	(東 海 大 学)
委員	須 山 恵 司	(浜松ホトニクス (株))
委員	千 田 直 道	(横 河 M & C (株))
委員	堀 江 和 泉	(ミ ノ ル タ (株))
委員	本 間 誠 一	(日本電気計器検定所)
委員	結 城 良 和	(日 本 分 光 (株))

委員外の参加者

杉 山 春 夫	(株) オプトリサーチ)
竹 下 秀	(東 海 大 学)
成 沢 二三男	(日 置 電 機 (株))
長谷川 幸 夫	(株) オプトリサーチ)
丸 山 敏 夫	(日本電気計器検定所)
柳 原 治 之	(横 河 M & C (株))

本報告書の内容は今後の技術の進歩，ニーズの多様化などに伴って、追補，改訂されるべきものであって、これに関する利用者の要望・コメントが寄せられることを望むものである。

目 次

I. 光電素子の相対分光応答度測定方法

1. 適用範囲	1
2. 用語の定義	1
3. 測定条件	3
4. 測定設備・機材	4
4.1 標準受光器	4
4.2 分光装置	5
4.3 光源	5
4.4 入射・出射の光学系配置	6
4.5 測定機材の配置	11
4.6 光電出力の増幅器	11
4.7 その他の測定支援系	13
4.8 測定の支援環境	13
5. 測定方法	13
5.1 標準及び試料のマウントの方法	13
5.2 波長設定	14
5.3 出射単色放射の受光面への入射	14
5.4 高次光の遮断と迷光の低減	14
5.5 迷光のチェック	14
5.6 測定のシーケンス	15
5.7 その他	15
6. 測定データ処理	15
6.1 相対分光応答度の求め方	15
6.2 迷光の推定と補正	17
6.3 データの誤差評価と規格化（正規化）の方法	17
6.4 その他	20
7. 測定結果の表示方法	22
7.1 試料に関する事項	22
7.2 測定条件に関する事項	22
7.3 測定結果	23
7.4 測定結果の例	23

Ⅱ．解 説

1. 適用範囲	解 1
2. 用語の定義	解 1
3. 測定条件	解 1
4. 測定設備・器材	解 2
4.1 標準受光器	解 2
4.2 分光装置	解 3
4.3 光源	解 3
4.4 入射・出射の光学系配置	解 3
4.5 測定器材の配置	解 4
4.6 光電出力の増幅器	解 6
4.7 その他の測定支援系	解 9
4.8 測定の支援環境	解 9
5. 測定方法	解 9
5.1 標準及び試料のマウントの方法	解 9
5.2 波長設定	解 10
5.3 出射単色光の受光面への入射	解 10
5.4 高次光の遮断と迷光の低減	解 10
5.5 迷光のチェック	解 10
5.6 測定のシーケンス	解 10
5.7 その他	解 10
6. 測定データ処理	解 11
6.1 相対分光応答度の求め方	解 11
6.2 迷光の推定と補正	解 11
6.3 データの誤差評価と規格化（正規化）の方法	解 11
6.4 その他	解 11
7. 測定結果の表示方法	解 14
7.1 試料に関する事項	解 14
7.2 測定条件に関する事項	解 14
7.3 測定結果	解 16
7.4 測定結果の例	解 16

解 説 の 付 録

250 nmより短い波長、1150 nmより長い波長における相対分光応答度の測定について

1. 波長250 nm以下の測定	解 17
1.1 標準受光器	解 17
1.2 分光装置	解 17
1.3 光源	解 17
1.4 入射光学系	解 18
1.5 出射光学系	解 18
1.6 その他の事項	解 18
2. 波長1150 nm以上の測定	解 18
2.1 標準受光器	解 18
2.2 分光装置	解 19
2.3 光源	解 19
2.4 入射光学系	解 19
2.5 出射光学系	解 19
2.6 その他の事項	解 19

Ⅲ. 付属書 1 輝度計の相対分光応答特性測定方法

1. ま え が き	付1-1
2. 輝度計の相対分光応答の測定条件	付1-1
3. 測定機材など	付1-2
3. 1 標準受光器	付1-2
3. 2 分光装置	付1-2
3. 3 光源	付1-2
3. 4 入射・出射の光学系配置	付1-2
3. 5 測定機材の配置	付1-6
3. 6 光電出力の増幅器	付1-6
3. 7 その他の事項	付1-6
4. 測定方法	付1-6
4. 1 輝度計と標準受光器のマウントの方法	付1-6
4. 2 波長設定	付1-6
4. 3 拡散面への照射	付1-8
4. 4 高次光の遮断, 迷光の低減	付1-8
4. 5 迷光のチェック	付1-8
4. 6 測定のシーケンス	付1-8
4. 7 その他	付1-8
5. 測定データ処理	付1-9
5. 1 相対分光応答度の求め方	付1-9
5. 2 迷光の推定と補正	付1-9
5. 3 データの誤差評価と規格化(正規化)の方法	付1-9
5. 4 性能の評価方法	付1-9
6. 測定結果の表示方法	付1-10

Ⅳ．付 属 書 2 遮 光 材 料 , フ ィ ル タ に つ い て

1. は じ め に	付2-1
2. 遮 光 材 料	付2-1
2. 1 黒 色 布	付2-1
2. 2 黒 色 紙	付2-2
2. 3 黒 色 塗 料	付2-2
2. 4 メ ッ キ	付2-2
2. 5 遮光材の反射により測定誤差が発生した例	付2-2
3. フ ィ ル タ	付2-7
3. 1 色ガラスフィルタ	付2-7
3. 2 干 渉 フ ィ ル タ	付2-11
3. 3 その他のフィルタ	付2-11

Ⅴ．参 考 受 光 器 構 成 要 素 の 個 別 測 定 に よ る 分 光 応 答 度 評 価

1. は じ め に	参考 1
2. 測定方法の違いによるデータの相違の原因	参考 1
2. 1 大きな原因と考えられるもの	参考 1
2. 2 小さな原因と考えられるもの	参考 2
3. 測 定 事 例	参考 2
4. 結 論	参考 5
5. お わ り に	参考 5

I. 光電素子の相対分光応答度測定方法

1. 適用範囲

公的機関等で分光応答度が値付けされた光電素子（シリコンフォトダイオード，以下 S P D）を標準器として、入射光強度と出力の間に比例性のある光電素子単体（各種フォトダイオード，光電管，光電子増倍管など、但し窓面に蒸着その他の方法で広帯域のフィルタを装着したものを含む）の相対分光応答度を波長 250～1150 n m の範囲で測定するとき。

なお、拡散面，フィルタ等と光電素子単体を組合わせた、受光器（フォトメータヘッド）などの相対分光応答度を測定するときもこの基準を準用する。

2. 用語の定義

この基準に用いる主な用語の定義は J I S Z 8113（照明用語），J I S Z 8120（光学用語），C I E 国際用語集（第4版）によるほかは次による。

(1) 光電素子単体

受光面及びその前面に光学的な素子（素子の窓面とは別のフィルタ，拡散面，結像系）を装着させない状態の光電素子（各種個体光電素子，光電管，光電子増倍管及びそれらに出力増幅機構を一体化したもの）を云う。但し窓面に蒸着その他の方法で広帯域なフィルタ（例えば $V(\lambda)$ ， $\bar{x}(\lambda)$ ， $\bar{y}(\lambda)$ ， $\bar{z}(\lambda)$ の近似フィルタ）を装着したものを含む。

(2) 複合放射

波長的な広がりをもった多成分スペクトル光を云う。太陽放射，電球光などが代表的なものであるが、線スペクトルや帯スペクトルが多数複合した放射も複合放射とみなすことができる。

(3) バイアス光

ある種の光電素子は、単色放射を照射したときと、複合放射を照射したときでは分光応答度が異なる。このようなものの分光応答度の測定は、複合放射を照射しながら、単色放射を与えて、分光応答度を測定しなければならない。このときに照射する複合放射をバイアス光とよぶ。このような測定では、例えばバイアス光を時間的に強度が変調されない直流的な光として照射し、単色放射は変調して与えて、バイアス光の加算によって生ずる測定上の誤差をさけるのが普通である。

(4) 標準受光器

国の機関、あるいは国の機関によって認定を受けた機関が、所定の手続きによって、国の標準から分光応答度などの値を付けた受光器。通常は光電素子単体である。

(5) 単色光の帯域幅

モノクロメータの出射単色放射の波長的な幅。出射単色放射のスペクトルの形が理想的な三角形、又は台形であればその半値幅が帯域幅である。

(6) 均 斉 度 (放 射 照 度 の)

放射照度の不均一性の度合いを示す値。対象とする面積内について、できるだけ多数の位置で放射照度を測定して、(最大値－最小値)／平均値 又は $\pm$ (全点の標準偏差)／平均値、あるいは $\pm$ (最大値－最小値)／(最大値＋最小値) で表す、通常%で表示する。

(7) 視 野 レ ン ズ (フ ィ ー ル ド レ ン ズ)

モノクロメータの入射スリットの直前に設置して、集光系の(開口)像をコリメータ又は分散系上に結像させるためのリレーレンズ。あるいは出射スリットの直後に設置して、分散系の像(単色像)を受光面上に結像させるためのリレーレンズ。

(8) 二 次 光 (の カ ッ ト)

回折格子モノクロメータでは、回折格子の高次分散によって、例えば波長ダイヤルを 600 nm にしたときに、600 nm の単色放射と共に波長目盛の $1/2$, $1/3$, ... (300 nm, 200 nm, ...) の単色成分が出射する。この成分(二次光, 三次光)を除去するために、測定波長範囲の長波長端の $1/2$ の波長よりやや長い波長で放射をほぼ完全に遮断する遮断フィルタを光路に挿入する。

(9) メ ッ シ ュ ス ク リ ー ン 減 光 板

ニュートラルフィルタの一種で、金属の薄板などに多数の細孔を開けてメッシュ状としたもの。

(10) メ カ ニ カ ル ス テ ー ジ

測定対象物等を安定に保持する機構を持ち、マイクロメータヘッド等を用いて光軸と測定対象物の受光面の相対位置の調整が再現性よく安定に実施できる取付装置。

(11) 有 効 開 口

光電素子単体又は受光器に光放射が入射した際に、有効に電気出力を発生させることのできる受光面の大きさ。

(12) 拡 散 板 (透 過 形 の)

入射した光放射ができるだけ Lambert の余弦法則にしたがうように、出射方向にかかわらず一定の放射輝度で発散させることのできる光学素子。この基準では、主として、石英ガラスを砂ずりしたものをを用いる。

(13) バ ン ド パ ス フ ィ ル タ (帯 域 フ ィ ル タ)

定められた波長範囲の光を透過し、それ以外の波長の光は遮断する光学フィルタ。波長範囲は最大透過率の $1/2$ の波長範囲(半値幅)あるいは、光をほぼ完全に遮断する短波長側の波長点と長波長側の波長点の間とする。

(14) 外 部 光

モノクロメータから出射する測定に有効な単色放射以外の光放射成分で、外部から漏れこんで検出される成分。外乱光ともいう。

(15) 光 電 素 子

光の照射により、起電力、電流、電気伝導度の変化などの電氣的出力を発生する素子。
(JIS C 1609「照度計」より引用)

(16) 受 光 器

狭義には、光電素子単体。広義には光電素子、駆動回路、フィルタその他の光学素子などを含めた、光を電氣的出力に変換する部分の総称。この基準では光電素子単体と区別しない場合は、広義の意味をとる。

(17) 光 電 出 力

光電素子単体や受光器からの電氣的出力。増幅器等の出力で示すこともある。

(18) 暗 出 力

光を照射しない状態での光電出力。増幅器等のノイズ、オフセット成分を含んで示すこともある。

(19) SPD (SiPD)

シリコンフォトダイオード (silicon photodiode) の略称。

(20) モニター受光器

光源の変動などを監視する目的で測定光路中に配置した受光器。

(21) $V(\lambda)$ 受光器

相対分光応答度を標準視感効率 (比視感度) $V(\lambda)$ に近似させた受光器。

3. 測 定 条 件

この技術基準で定める測定のための条件は次のとおりとする。

(1) 試料の構造など

測定の対象とする光電素子単体または受光器 (以下試料とよぶ) は、機械的に安定で、設置位置の再現性が十分確保できるような構造であること。

(2) 試料の安定性

測定の対象とする光電素子単体または受光器は、その出力が、測定のために入射する入射光レベルの範囲で、十分安定であること。

(3) 周囲温度

測定中の周囲温度はできるだけ一定であること。光電素子の中には分光応答度の温度係数がかかなり大きいものがあるので、とくに素子の温度を一定に保つことが重要である。

(4) バイアス電源

光電管や光導電形素子の外部電源、光電子増倍管のダイノード電源などのバイアス電源を使用するときには、電源の変動が出力の変化をもたらさないように、十分に安定度のよいものを用いる。

(5) 受光面への入射方向と入射ビームの開き角

標準受光器及び試料の受光面への入射は、法線方向とし、入射ビームの開き角（立体角）は 15° 以下にすること（これは偏光に対する考慮からである）。拡散面を用いたときには、受光面の有効面積から拡散面中心を見込んだ立体角が 15° 以下になるようにする。

(6) 照射用光源の安定性

照射用（単色光発生のための）の光源は、測定中の光出力の変動が、できるだけ少なく、且つ、集光した状態での結像の位置が安定していること。このために点灯には、十分に安定化した電源又は点灯装置を用いる。

(7) チョッピング周波数の安定性

入射光を断続光（チョッピング光）とするときは、チョッピング周波数は十分安定であり、且つ、測定対象の光電素子はその周波数で安定に動作すること。

(8) バイアス光の照射

光電素子の種類によっては、素子に単色放射だけが与えられたときと、複合放射が与えられたときでは、分光応答度が異なるものがある。このようなものについては、分光応答度の測定を複合光（バイアス光）照射下で行う必要があるので、あらかじめバイアス光照射ができるような光路を考えておく。

(9) 外乱からの遮へい

測定に際しては、標準受光器及び試料に対して外光の遮光、電磁環境（誘導ノイズなど）に対する遮へいが、十分に行われているか、あるいはそれらの影響が補正できるようになっていること。

4. 測定設備・機材

4.1 標準受光器

公的機関（当面は電子技術総合研究所）で（相対）分光応答度が値付けされたもの、またはその値に準拠して校正されたものを用いる。分光応答度が値付けされている波長範囲内では補間値を使用してよい。

当面の具体的な標準受光器は波長 250～1150 nm で値付けされたシリコンフォトダイオード (SPD) である。

分光応答度の標準受光器の校正期間は、紫外域で±1%程度の確かさを保つためには、使用の有無にかかわらず1年程度とすべきである。可視域での経時変化は比較的すくないが、数年間で数%の変化があった場合もあるので、最長でも2～3年で再校正を行うべきである。なお、標準は複数個 (通常3個) を一組として随時に相互チェックしながら使用する。

4. 2 分 光 装 置

原則として、回折格子形モノクロメータ (シングル, ダブル, ブリズムと複合形のダブルのいずれでもよい) を用いる。、出射する単色放射の照射面の放射照度のむらが少なく、迷光 (散乱光) の少ない構造のものであること。

単色放射の帯域幅は最大10 nmまでとれることが望ましく、波長分解能 (波長よみとりの最小値単位) は 0.5 nmより細かいこと。

具体的にはツェルニー・ターナ マウントのモノクロメータが最も適している。

回折格子のブレイズ波長 λ_b は200～300 nmにあり、格子定数は 600～1200本/mmのものがよい。ただし、測定波長域を 350 nm以上に限定するときには λ_b は 400～600 nmでよく、この方が可視域での出射強度が大きい。

4. 3 光 源

測定波長域が350 nmより長波長ならばハロゲン電球 (100～250W)、350 nm以下の紫外域を測定するときはキセノンランプ (75～150W) を使用する。

長波長側ではハロゲン電球は1150 nmまで使用できるが、キセノンランプは 800 nm以上では輝線が強く出て、応答の波長に対する再現性が悪くなるので 800 nm以上では使用しない方がよい。また、キセノンランプは 460～480 nm にも輝線があるので、波長の目盛合せの再現性に注意が必要である。

ハロゲン電球は JC 形 (光学機器用) が適当であるが、フィラメント (コイル) の軸とモノクロメータのスリットの高さ方向を一致させて使用するために、水平方向で (横向きに) 点灯する。

点灯電圧は定格値 (例えば24V) の90～95%とする (安定度及び寿命の保持から)。電源は電流容量に十分余裕のある安定化電源を用い、適当なランプハウスを用いて点灯する。ランプハウスは通気が十分できる構造であること。

キセノンランプは直流点灯の短アーク形を用いる。安定性のよい種類のものを用いる。キセノンランプはスタート時に10 kV以上のパルスを加えるので、周辺の電子装置に対して十分なシールド (空中及び電源ライン) が必要である。ランプハウスはこのことを考慮した構造とする。キセノンランプは完全に定常状態に達するまでに5～10分の待機時間が必要である。

光源は光中心を前後, 左右, 上下方向に滑らかに位置調整できるメカニカルステージ等に取り付ける必要がある。これは幅1 mm程度のモノクロメータの入射スリット上に光源フィラメント, アークスポットなどの像を正しく結像させるためであって、

特に左右方向は1 mm以下の微調が安定に行える必要がある。光源の位置調整は、光源を交換したときなどには必ず行わなくてはならない。

4. 4 入射・出射の光学系配置

(1) 入射の光学系(集光系)

凹面鏡又はレンズを用いて、光源の像をモノクロメータの入射スリット上に結像する(集光)。結像の倍率は等倍(1:1)が普通である。代表的な光学系配置を図4. 1に示す。

入射光学系の機能は、モノクロメータの分散系(回折格子)の面にできるだけ強い放射を均一に当てることである。このためには、光源から凹面鏡又はレンズに入射した放射が、効率よく狭いスリットを通過して、分散系に達しなくてはならないので、一旦スリット上に結像させる。このときに結像点が(前後又は左右に)移動すると、分散系に当たる放射の量とその均一性が大きく変動するので、光源の位置の安定性が重要となる。

入射系(集光)にレンズを使用すると、レンズの焦点距離は波長によつて変動するので(色収差)、結像点がスリットの前後に移動して、その結果、分散系の面上の放射照度の低下や均斉度の悪化などの不都合が生じる。これは特に紫外域において著しい。したがって、紫外域を含む広い波長域で測定を行うための入射光学系はできるだけ凹面鏡を用いる。

凹面鏡又はレンズの口径 d_1 は、入射スリットから凹面鏡又はレンズまでの距離を l_1 、モノクロメータの焦点距離を f_c 、回折格子の口径を D (D は 50×50 mm位のことが多い)とすると(4. 1)式のようになる。

$$d_1 \geq D \frac{l_1}{f_c} \quad (4. 1)$$

凹面鏡又はレンズの焦点距離は図4. 1に示す。

光源の発光部の形状が点状でなく、スリットの高さ方向に広がっているとき(ハロゲン電球のフィラメントなどがその例である)には、入射スリットの直前に、口径がスリット高さよりやゝ大きい視野レンズ(フィールドレンズ)を置くと、集光の効率と分散系上の放射照度の均斉度が向上する。視野レンズの焦点距離 f_f は l_1 と等しくする。このレンズの色収差による影響は比較的少ない。

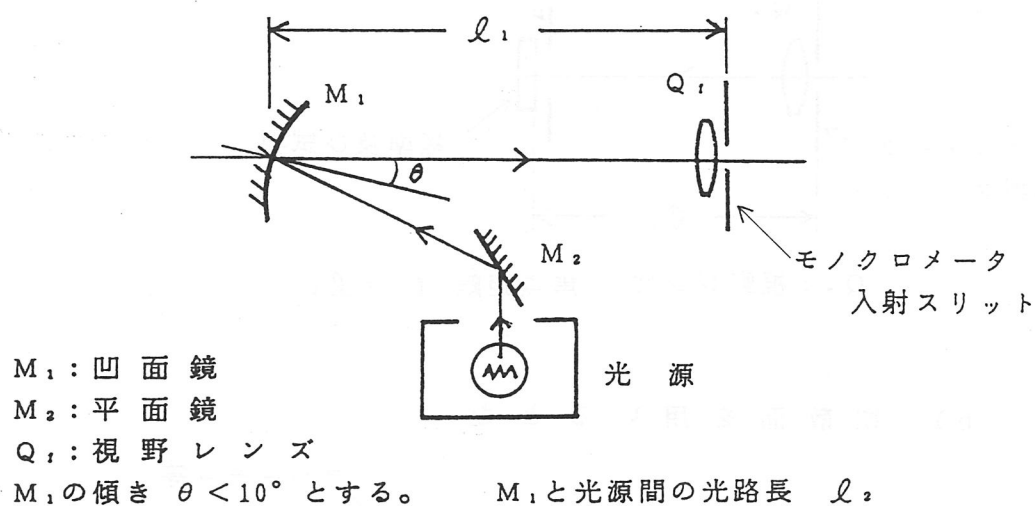
レンズの材料は石英(できれば合成石英)がよいが、可視域だけならばガラス(BK7等)でよい。凹面鏡はアルミ蒸着とする。

(2) 出射の光学系

モノクロメータの出射スリットから発散する単色光を、標準及び試料の受光面上に導くための光学系である。この光学系の代表的なものを図4. 2に示す。

それらは、(a)結像光学系を用いる。(b)拡散面を用いる。(c)光ファイバー束を用いる。の3種類である。これらの特性と使用方法を以下に示す。

(1) 凹面鏡使用の光学系



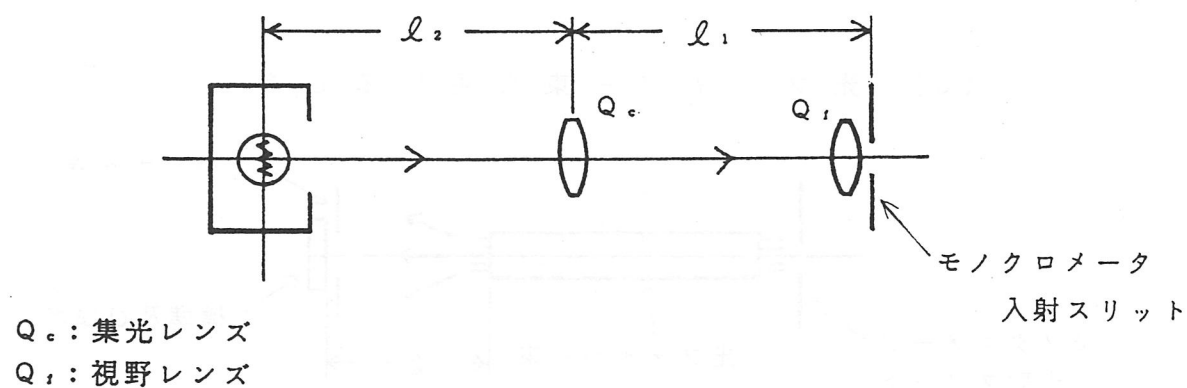
M_1 の焦点距離 f_1

$$f_1 = \frac{l_1 \cdot l_2}{l_1 + l_2}$$

光源像の投影倍率 m

$$m = \frac{l_1}{l_2}$$

(2) 集光レンズ使用の光源系



Q_c の焦点距離 f_1

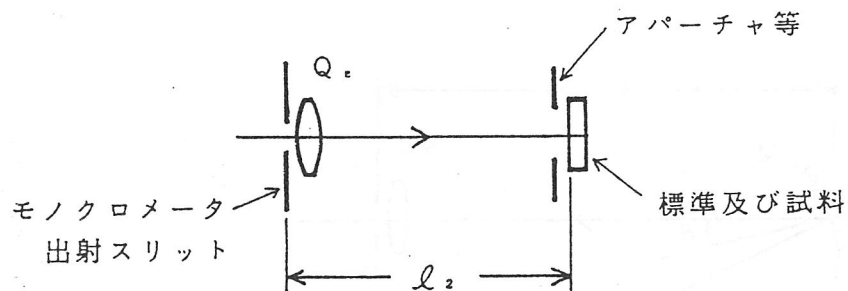
$$f_1 = \frac{l_1 \cdot l_2}{l_1 + l_2}$$

光源像の投影倍率 m

$$m = \frac{l_1}{l_2}$$

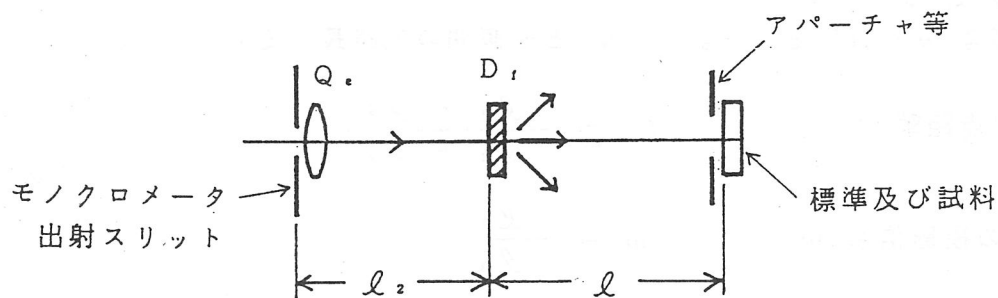
図4.1 入射光学系

(a) 結像系を用いるとき



Q.: 視野レンズ, 焦点距離 $f. = l_2$

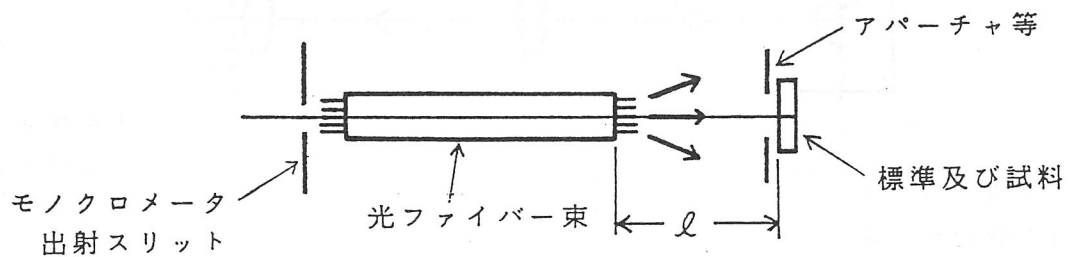
(b) 拡散面を用いるとき



Q.: 視野レンズ, 焦点距離 $f. = l_2$

l は測定対象の面積によって調整する

(c) 光ファイバー束を用いるとき



l は測定対象の面積によって調整する

図 4. 2 出 射 の 光 学 系

(a) 結像系を用いる方法

出射スリットの直後に、口径がスリット高さよりやや大きい、焦点距離 f_2 の視野レンズを置くと、このレンズによって口径 d_2 の単色放射の像（回折格子の像）が、距離 l_2 の位置に結像するので、その位置に標準及び試料の受光面を置いて測定する。

d_2 の大きさは (4. 2) 式のとおりである。

$$d_2 \approx D \frac{l_2}{f_c} \quad (4. 2)$$

d_2 は標準及び試料の受光面の大きさが異なるときは、どちらか大きいほうの大きさよりも大きくする。

この方法による単色放射の放射照度は3種の方法の中で最も大きくでき、光源の結像調整が十分であれば照度の均斉度も十分とれる。しかし、そのためには入射系には凹面鏡を用いなければいけない。また、光源や光学系の位置調整にかなりの熟練を必要とする。

(b) 拡散面を用いる方法

これは (a) と同様の視野レンズを使用して、単色放射の像面に透過形の拡散面を置く。試料及び標準は、それらの受光面の有効面積から拡散面の中心を見込んだ立体角が 15° 以下になるような距離をとり、拡散面の後面に置く (図 4. 2 b)。例えば 10ϕ の受光面のときはこの距離 l は 40 mm 以上になる。

標準と試料の受光面の大きさが異なるときはどちらか大きい方に対して定め、原則として同じ距離で測定する。拡散面は紫外域まで測定する場合は合成石英を $100\sim 200$ メッシュで砂ずりした面（片面又は両面）を用いる。可視域だけのときは、ガラス砂ずり面またはオパールガラスを用いる。この方法は入射系の結像の調整が、ある程度不十分であったり、色収差がある（レンズを使用する）ときでも、受光面の放射照度の均斉度を十分よくできる。しかし、放射照度のレベルは (a) の場合の $1/10 \sim 1/100$ になる。

(c) 光ファイバー束を用いる方法

例えば、一端（入射端を）モノクロメータのスリットの幅と高さに対応した矩形に形成し、他端（出射端）を円形又は正方形に成形した、長さ 100 mm 以上の光ファイバー束を作り、入射端をモノクロメータの出射スリットには密着させ、出射端から発散する単色光ビームを使用する。このビームの中央部分（ファイバーの材質等で異なるが、ビーム口径の $50\sim 80\%$ 位の範囲）の放射照度の均斉度は非常に良好で、入射系結像状態の影響が少ない。放射照度のレベルは (a) の $1/3 \sim 1/5$ 位である。ファイバーの素線は太い（例えば $0.5\text{ mm}\phi$ ）方がよい。材料は紫外まで使用する場合は石英とするが、 400 nm 以上だけならプラスチックでもよい。

表 4. 1 にこれら3種の方法の比較を示す。

表 4. 1 出 射 光 学 系 の 比 較

	a) 結 像 系	b) 拡 散 面	c) 光 ファイバ ー 束
適 合 す る 入 射 系	凹 面 鏡	レ ン ズ , 凹 面 鏡	レ ン ズ , 凹 面 鏡
単 色 放 射 の 放 射 照 度	最 も 強 い	a) の $1/10$ 以下	a) の $1/3 \sim 1/5$
単 色 放 射 の 均 斉 度	調 整 が よ け れ ば 十 分 よ い	よ い	十 分 よ い
調 整 ・ 保 守	適 宜 調 整 が 必 要	容 易	容 易
測 定 対 象	熱 形 検 出 器	一 般 に 使 用 出 来 な い	条 件 に よ っ て は 使 用 で き る
	光 電 素 子 単 体	使 用 で き る	使 用 で き る
	受 光 器 ヘ ッ ド な ど	使 用 で き る	使 用 で き る
	結 像 系 の あ る 受 光 器	使 用 で き な い	?
R e f. 受 光 器 の 使 用		使 用 で き る (図 4. 3)	分 岐 形 ファイバ ー 束 を 使 用 い れ ば 使 用 で き る
使 用 で き る 長 波	モ ノ ク ロ メ ー タ が 使 用 で き る 全 範 囲	短 波 長 が 大 き い	短 波 長 側 で か な り 低 下 す る
コ ス ト	最 も 低 い	低 い	高 い

4. 5 測定機材の配置

(1) 測定対象（試料及び標準）

標準受光器と試料の位置を再現性よく安定に保つために、前後、左右、上下に滑らかに位置移動が可能なメカニカルステージなどによるホルダーを設ける。これらは特に4. 4, (2) (a) の方式を用いたときに重要である。

(2) フィルタ、減光板などの配置

二次光カット、迷光の低減などの目的で光路中にフィルタを入れるときは、入射側であればモノクロメータの入射スリットと凹面鏡又はレンズの中間に入れる。出射側であれば、出射スリットと受光面の中間に入れる（光ファイバー束使用の時は、ファイバー出射端と受光面の中間）。

スリットの近くでは光ビームが絞られて、フィルタが熱的な損傷を受けたり、フィルタ面のむらなどの影響がでやすくなったりするので、できるだけスリットから離す。メッシュスクリーン減光板を用いたときは特に注意が必要である。また、入射側ではフィルタを光源に接近させすぎると熱的な損傷を受けることがあるので注意する。

出射側ではフィルタ面と標準又は試料の受光器面の対向による相互反射の影響があるので、フィルタを多少傾けて、受光面からの反射光を光路から外すようにする。

(3) チョップパなどの配置

原則的に入射側に入れるが、モニター受光器を使用し、かつ、試料へ入射する放射のチョッピング周波数を変える必要があるときは、チョップパを出射側のモニター受光器よりも後の光路に入れる。

(4) Ref. 受光器（モニター受光器）を入れる場合

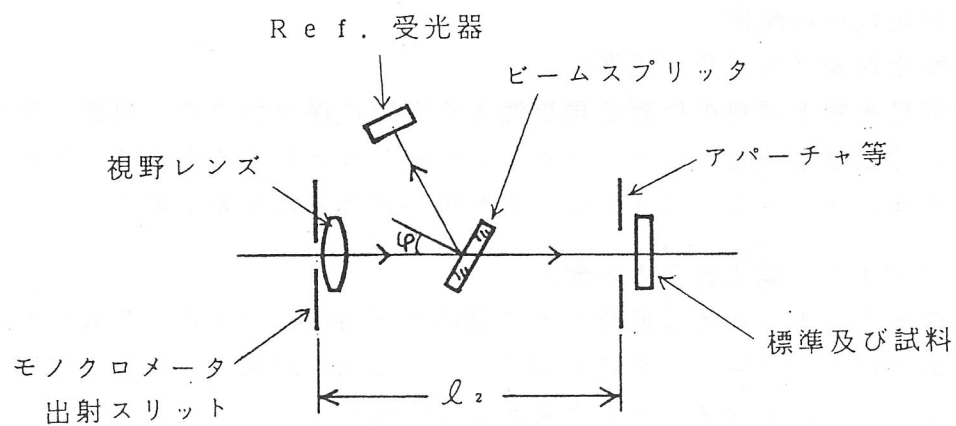
測定が長時間にわたるとき、光源の安定性に不安があるときなどには、測定の信頼性を保つためにRef. 受光器を用いて波長ごとに、標準／Ref. ペア、試料／Ref. ペアの測定を行って、Ref. を置換標準とした測定を行う。この際のRef. の配置の例を図4. 3に示す。ビームスプリッタには石英板を使用し、表面反射光（約8%）をRef. 受光器に導く。

(5) シャッタの位置

できるだけ光源に近い位置にする。図4. 1の(1)では M_2 と光源の間、図4. 1の(2)ではQ.と光源の間が望ましい。これは光源の放射や熱を測定時間以外は遮断して光学系（とくにミラー）が劣化することを防ぐためである。

4. 6 光電出力の増幅器

標準及び試料の出力は適当な増幅器を用いてデータ処理装置などへ導く必要がある。増幅器について要求される事項は次のとおりである。



$$\varphi : 10^\circ \sim 45^\circ$$

図 4. 3 Ref. 受光器（モニタ受光器）配置の例
 （拡散板を用いたときは拡散板と試料の間に入れる）

(1) ダイナミックレンジが広い

光電流範囲で $10^{-9} \sim 10^{-5}$ A 程度の範囲が安定に増幅でき、レンジの切換えが容易であること。出力は最大 5 V 程度まで直線性がよいこと。1 レンジ内でのダイナミックレンジは 4 桁以上とれること（例えば出力 0.1 ~ 5 V で使用できる）。

(2) ノイズ, ドリフトが少ないこと

ノイズは出力レベルで 1 mV rms 以下（出力 0.1 V のとき 1 % 以下）が望ましい。ドリフトは特に温度変化に対して大きくないこと。

(3) 応 答 速 度

増幅器の時定数は 0.3 sec 以下が望ましい。チョッパを使用してロックイン検出を行うときは、チョッパの周波数が低いと時定数が大きくなるので注意する。

暗状態から入射して測定する際には、振幅が最終値の 99 % になるまでの時間は時定数の約 5 倍である。

4. 7 その他の測定支援系

(1) 目的に応じて光源, 試料等を設置する光学ベンチ, キャリア, 位置調整用のメカカルステージ等が必要になるので用意する。

(2) 標準, 試料を遮光するためのハウジング（暗箱）が必要である。

(3) データ処理, 機器制御のためのコンピュータシステムとそのインターフェース。

光電出力のコンピュータ入力には GPIB, RS232C などのインターフェースを備えたデジタル電圧計または A/D コンバータが必要であるが、分解能（0.1 ~ 5 V の出力に対して 4 桁以上の分解能を保つためには 5 桁以上のデジタル電圧計または 16 bit 以上の ADC が必要である）、変換時間（ノイズを考慮して、ある程度積分する方がよい）を十分検討して用いる。

4. 8 測 定 の 支 援 環 境

ある程度遮光できること（試料, 標準を暗箱に入れば暗室である必要はない）。周囲の温度, 湿度は標準的な状態を保てればよい。但し、標準及び試料の温度は測定中は一定に保つ。振動はできるだけ少ないこと。

5. 測 定 方 法

5. 1 標準及び試料のマウントの方法

標準及び試料の受光面は出射ビームの中心光軸に垂直となるようにし、出射ビームの中心と受光面の中心が一致するように設置する。

標準及び試料の取付け、取り外しの再現性を維持させるために、専用の取付治具を設け、位置設定の微調整が行えるようにメカカルステージを用いることが望ましい。

（4. 4 (2)、4. 5 (1) 参照）

5. 2 波 長 設 定

- (1) 測定波長範囲； 250 ～ 1150 nm（最大）
- (2) 測定波長間隔； 5 nm または 10 nm
- (3) 波長帯域幅 ； 原則として 5 nm 以下（10 nm を越えないこと）

少なくとも可視波長全域についての単色放射の波長帯域幅は一定値に近いことが望ましい。普通使用されている回折格子モノクロメータは低圧 Hg ランプの輝線スペクトル 546.1 nm を用い、波長間隔と帯域幅の整合を行えば（波長間隔と帯域幅を等しくする）ほぼこの条件を満たす。

5. 3 出射単色放射の受光面への入射

出射単色放射の放射照度の均斉度が十分によい部分が、標準及び試料の受光面の有効開口の全面に照射するようにする。均一な単色放射が照射されれば、標準及び試料の受光面の大きさや形状にかかわらず相対比較が可能となる。

この均一な単色放射を照射させる方法として、4. 4 (2) (b) に示すようにモノクロメータの出射スリットと標準及び試料の受光面の間に、視野レンズ（石英製）と拡散板（石英ガラスの砂ズリ板 100～200 メッシュ）を設置するのが一般的である。

5. 4 高次光の遮断と迷光の低減

回折格子の高次分散光（二次光）をカットするために、適当な波長（例えば 480 nm、あるいは 580 nm 付近）に遮断波長を持つシャープカットまたはワイドバンドパスフィルタを光路に入れて、波長走査に応じて切り換えるようにする。ワイドバンドパスフィルタとニュートラルフィルタを併用すれば、迷光の低減と出射光のレベル調整にも効果がある。

5. 5 迷 光 の チ ェ ッ ク

モノクロメータの迷光とは、設定した波長の帯域以外の波長成分出射光である。これは主として分散素子（回折格子、プリズム等）で分光されずに、分散素子表面や装置内で散乱反射した入射光によって生ずる。連続スペクトル光源（特にハロゲン電球）入射の場合は長波長側の放射が強く、したがって、短波長側の成分を分光測定するとき相対的に長波長成分の多い散乱光が迷光として大きく影響してくる。また標準又は試料に SPD を用いるときは長波長側の分光応答度が高いため、長波長成分の大きい迷光の影響を一層大きく受けることになる。迷光が含まれているときは、その割合を評価してこれを補正することが必要である。

迷光の補正は次の手順によって行うのが一般的である。

- (1) モノクロメータの波長を設定して標準又は試料の出力を測定する。
- (2) 透過限界波長が(1) の設定波長より 50 nm 程度長波長にあるシャープカットフィルタを光路に挿入して標準又は試料の出力を測定する。このときの出力をシャープカットフィルタの透過域の透過率（通常 0.92 とする）で除した値が、およそその迷

光成分と考えてよい。

(3) (1) の値から (2) の値を差し引いて、標準又は試料の真の出力を求める。

5. 6 測定 の シ ー ケ ンス

(1) 標準、試料ごとの単独個別波長走査

光源の安定性が長時間にわたって確保できないと測定精度が保証できない。この測定では光源を集光して使用するので、光源を選択するなどして安定維持に注意しなければならない。測定の確からしさを維持するには、複数回測定して比較することが必要である。また光源出力をモニターしてその安定性を確認することも必要である。(4. 5 (4) 参照)

(2) 波長ごとの 標準／試料 の 比較

標準と試料とを各測定波長ごとに比較して分光応答度を測定することが一般的である。しかし、この方法は光路が複雑になりミラー、光ファイバー束などの光分岐装置が必要である。

標準で参照 (Ref.) を値付けして、参照／試料 の比較を行うことは可能であり、4. 5 (4) に示した方法を用いれば測定も容易である。

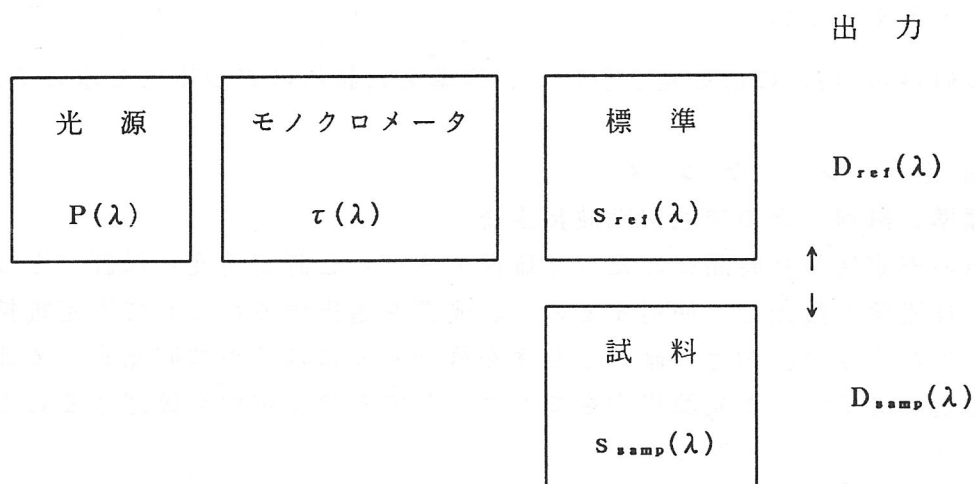
5. 7 そ の 他

- (1) 標準と試料の各々の受光面積、形状等はあまり大きく異なることが望ましい。
4. 4 (2) (b), (c) に示した拡散板または光ファイバー束を用いたときは、受光器と拡散板との距離を変えて対応することが考えられる。この場合、出射光の配光を波長ごとに測定しておくことが必要である。
- (2) 一般に光電素子の出力は限界波長に近づくと微小になり、このときに、外部雑音の影響を受けやすくなる。したがって標準及び試料を設置するときは、
 - (a) 外部光の漏洩を完全にカットすること
 - (b) 電磁シールドボックスを用いることが望ましい (3. (9) 参照)
- (3) 測定しようとする光電素子の種類によっては、その応答度が大きな温度依存性をもつものがある。したがって標準及び試料の設定室内の温度は一定に保つよう十分な管理が必要である。(3. (3) 参照)

6. 測定 データ 処理

6. 1 相対分光応答度の求め方

モノクロメータから出射した単色放射の放射照度は波長ごとに異なるため、試料からの光電出力そのままでは、相対分光応答度とはならない。したがって、通常はすでに相対分光応答度の分かっている標準受光器と比較測定して、入射光源の分光分布、及びモノクロメータの分光透過率の影響をキャンセルする。



$$D_{ref}(\lambda) = \alpha \cdot P(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S_{ref}(\lambda) \quad (6.1)$$

$$D_{samp}(\lambda) = \alpha \cdot P(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S_{samp}(\lambda) \quad (6.2)$$

(6.1) 式、(6.2) 式より

$$\therefore S_{samp}(\lambda) = S_{ref} \cdot \frac{D_{samp}(\lambda)}{D_{ref}(\lambda)} \quad (6.3)$$

ここに、 $D_{ref}(\lambda)$: 標準の波長ごとの出力

$D_{samp}(\lambda)$: 試料の波長ごとの出力

$P(\lambda)$: 光源の分光分布

$\tau(\lambda)$: モノクロメータを含む光学系の分光透過率

$S_{ref}(\lambda)$: 標準（受光器）の相対分光応答度

（電子技術総合研究所値付けのSPDなど）

$S_{samp}(\lambda)$: 試料の相対分光応答度

α : 各要素の位置関係、光学系、アンプのゲインなどで決まる
比例定数

(6.3) 式が基本となるが、実用測定器においては、アンプのオフセット電圧の補正処理やドリフト補正処理などが行われている。

(1) オフセット処理

光路の適当な位置（通常は入射側）にシャッタを設け、測定の途中で定期的にシャッタを閉じて、暗出力（オフセット）をチェックする。この値を測定の生データ $D'(\lambda)$ から減算する。

$$D(\lambda) = D'(\lambda) - \text{offset} \quad (6.4)$$

シャッタの開閉頻度としては、(1) 各設定波長ごと (2) 何回かの測定ポイントごとに1回 (3) 測定開始前及び終了後、のような処理方法が適宜とられる。

(2) 光源の変動補正

(6.3) 式においては、光源の分光分布 $P(\lambda)$ はキャンセルされているが、実際の測定では標準（受光器）への入射のときと試料へ入射したときで、光源の強度が変化した場合には測定精度にそのまま影響がでる。このようなときには、標準（受光器）測定時と試料測定時にそれぞれ単色放射の放射照度をモニタ受光器でチェックして、変化分を補正して光源の変動の補正をする。この場合、(6.3) 式に以下の式で与えられる変動の補正係数 $K(\lambda)$ を乗じる。

$$K(\lambda) = \frac{\text{標準受光器測定時のモニタ出力}}{\text{試料測定時のモニタ出力}} \quad (6.5)$$

6.2 迷光の推定と補正

分光応答度の実用測定器には、回折格子とプリズムを組み合わせたいわゆるダブルモノクロメータがよく採用されている。この方式は、回折格子を主たる分散素子とし、回折格子からの迷光や高次回折光などは、プリズムを前置フィルタとして用いることによりカットしている。したがって、この方式を用いるときは迷光も少なく、データ処理上、特に迷光補正は行われていない。

単式（シングル）の回折格子モノクロメータを用いるときには、高次光を遮断すると共に、迷光をできるだけ除去し、除去できない分はその量を推定してデータから差し引く必要がある。

高次光の遮断は普通はシャープカットフィルタを用いる。例えば、250～1150 nm の波長範囲であれば、500 nm 以下をカットするフィルタと、1000 nm 以下をカットするフィルタを使用し、250～800 nm であれば500 nm 以下、300～1150 nm なら600 nm 以下をカットするフィルタを用いればよい。（5.4 参照）

迷光の評価は5.5(1)～(3)に示した手順によって行う。迷光の評価は全波長域で行う必要はなく5.5(2)の値が(1)の値の $1/200$ 以下になれば省略してよい（電球使用のときは400 nm 以下の短波長側が迷光評価の対象になると考えてよい）。

なお、短波長域であらかじめ迷光を低減する対策として、紫外域のバンドパスフィルタ（UV-D33S，U-330 など）を併用するのが効果がある。

6.3 データの誤差評価と規格化（正規化）の方法

(1) 測定の不確かさの評価

(a) 測定の有効桁（有効数字）

分光応答度測定において最も厄介な問題の一つは、光電出力の S/N 悪化による測定精度の低下である。標準及び試料からの出力が小さかったり、バラツキの幅が大きかったりした場合には、相対分光応答度の計算結果を4桁の数字で示したとしても、波長領域によっては実際上はそれよりもはるかに有効桁が少なくなる場合がある。

$V(\lambda)$ 受光器のように分光応答度がゼロから立ち上がって、最後にまたゼロになるタイプの分光応答度の誤差評価はとくに難しい。このようなものでは、本来

ゼロであるべき波長のデータがゼロ以外の値になったり、ゼロ近辺での測定の有効桁が2桁、1桁というように極端に低下する現象が生じる。これを確認するには(b)に示すように、同一試料について複数回の測定を行い、データの再現性をチェックして測定結果の有効桁を確認することが必要である。

(b) 測定値の不確かさの表し方

測定の確からしさを高めるためには、複数回の測定を行なう必要がある。そのやり方としては、i) 1回の波長走査中の各測定波長点で複数のよみをとる単純くり返し測定、ii) 波長走査そのものを複数回行なって、同じ波長のよみを比較する測定、の2種類があるが、i)の方法では短時間の中での測定のゆらぎしか評価できないので、確かさ、とくに再現性を重視するときにはii)の方法を用いなければならない。そのときにはi)の方法を複数回くり返して波長走査を行なって、ii)のデータとするのが理想的である。

これらのデータについての不確かさは次のように見積もる。

イ) i)の方法によるデータだけのとき

各波長点でのよみ(よみの回数 m)の平均値 $\bar{x}$ を測定値とし、不確かさは標準偏差SDの2倍(2シグマ)の値をとるか、次の値 t (95%の信頼区間)をとる。

$$t = \frac{SD}{\sqrt{m}} \cdot t_0 \quad \text{ここで } t_0 \text{ は表 6. 1 の値である。}$$

これらの値は、通常はよみの平均値に対する±の%で示す。

ロ) ii)の方法によるデータで各波長点のよみが1回だけのとき

波長走査の回数を n 回として、平均値 $\bar{x}$ を測定値とし、不確かさは、同じ波長点でのよみ(n 回)の標準偏差SDの2倍(2シグマ)の値をとるか、次の値 t (95%の信頼区間)をとる。

$$t = \frac{SD}{\sqrt{n}} \cdot t_0 \quad \text{ここで } t_0 \text{ は表 6. 1 の値である。}$$

これらの値は、通常はよみの平均値に対する±の%で示す。

ハ) i)の方法を複数回行なったとき

波長走査回数を n 回、各走査の波長ごとのよみの回数を $m_1, m_2, \dots, m_n$ とする。このときは各走査ごとのデータの平均値を $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$,

$$\text{全測定の平均値 } \bar{\bar{x}} = \frac{m_1 \bar{x}_1 + m_2 \bar{x}_2 + \dots + m_n \bar{x}_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

を測定値として、不確かさは

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{n-1}} \quad \text{をもとめて}$$

SDの2倍の値をとるか、次の値 t (95%の信頼区間)をとる。

$$t = \frac{\overline{SD}}{\sqrt{n}} \cdot t_0 \quad \text{ここで } t_0 \text{ は表 6. 1 の値である。}$$

これらの値は通常平均値 $\bar{x}$ に対する $\pm$ の % で示す。

イ) の結果は単純な測定のばらつきだけを示すもので、測定の再現性を明らかにするためにはロ) ハ) の値を用いなければならない。

表 6. 1

よみの回数 m 又は n	t_0
2	12.71
3	4.30
4	3.18
5	2.78
6	2.57
7	2.45
8	2.36
9	2.31
10	2.26

(2) データの規格化 (正規化)

(a) 分光応答度のピーク値で規格化する方法

分光応答度のピーク波長における応答度を 1 として、相対分光応答度を規格化する方法である。応答度のピーク波長のズレなどが判断しやすく、一般によく用いられている方法である。

(b) 測定全域の平均値で規格化する方法

測定した全波長域の分光応答度の平均値 (又はトータル値) で規格化する方法である。これは、6. 3 (1) で述べたくり返し測定のバラツキの評価をする際に有効である。この方法は「くり返し測定の平均値は一定である」と仮定して、くり返し測定の各データのバラツキを検証する。

最大値を 1 とする正規化の方法は 1 回だけの測定では問題はないが、複数回の測定のデータを比較する際に、ピーク波長の応答度は常に 1 であると考えねばならず、ピーク波長でのデータのバラツキ (これは当然存在するはずである) が求められない。

したがって、くり返し、複数回の測定の平均やバラツキを求めるときは、一旦、平均値で規格化してから、その波長ごとの値を平均し、その結果に対して最終的にピーク値を 1 とするような規格化が必要である。

(c) CIE の標準光の A、及び V(λ) により規格化する方法

本手法は、照度計の分光応答度を評価するために JIS C 1609 - 1993「照度計」並びに新計量法（1993.11.1より施行）に示されている手法で、以下のような計算を行う。

$$s'_{rel}(\lambda) = \frac{\sum_{380}^{780} P_A(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{380}^{780} P_A(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot s_{rel}(\lambda) \quad (6.6)$$

ここに、 $P_A(\lambda)$: CIE 標準の光 A（分布温度 2856 K）の相対分光分布
 $V(\lambda)$: 標準視感効率
 $\Delta(\lambda)$: 測定波長間隔（5 nm）
 $s_{rel}(\lambda)$: 規格化前の相対分光応答度
 $s'_{rel}(\lambda)$: 規格化後の相対分光応答度

※波長積分の範囲は、JIS では 380～780 nm、新計量法では 360～830 nm となっている。

本方式は、「照度計は分布温度 2856 K の標準電球で校正されている」という前提がある場合に、極めて有効な規格化方法である。すなわち、「ある単色放射に対し、照度計の出力が大きめに表示されるか少なめに表示されるか」ということを検討するとき、本手法によって規格化された場合には、 $s'_{rel}(\lambda) / V(\lambda)$ が真値に対する比となるし、その逆数が色補正係数（後述）となるからである。前述したピーク応答度波長を 1 に規格化する手法ではこのような計算は成り立たない。

6.4 その他

(1) 色補正係数

V(λ) 受光器は、その分光応答度が標準視感効率にできるだけ近似するように設計・製作されているが、完全には一致していないため、校正に用いた光源（通常は標準の光 A）と相対分光分布が異なる光で測定した場合に誤差が発生する。これを補正するために乗ずる係数を色補正係数（CCF Color Correction Factor）といい、以下の式で与えられる。

$$CCF = \frac{\sum_{380}^{780} P_A(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{380}^{780} P_A(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \times \frac{\sum_{380}^{780} P_T(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{380}^{780} P_T(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (6.7)$$

ここに、 $P_A(\lambda)$: 標準の光 A (分布温度 2856 K) の相対分光分布
 $P_T(\lambda)$: 試料光源の相対分光分布
 $s(\lambda)$: $V(\lambda)$ 受光器の相対分光応答度 (規格化の方法は任意)

6. 3 (2) (c) の方式で相対分光応答度が規格化してあれば

$$CCF = \frac{\sum_{380}^{780} P_T(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{380}^{780} P_T(\lambda) \cdot s'_{rel}(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (6. 8)$$

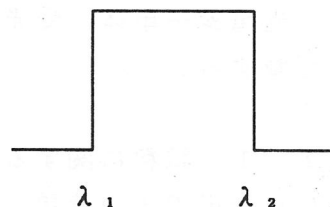
となり、非常に簡単な式となる。試料光源が単色光であれば積分計算も不要となり、 $V(\lambda)/s'_{rel}(\lambda)$ が色補正係数となる。

(2) $V(\lambda)$ 受光器の性能評価

照度計に関する JIS , 及び計量法が 1993 年に大幅に改正された。分光応答度の評価方法については JIS 、計量法ともにほぼ同様 (波長積分範囲の違い程度) であるため、旧 JIS ・旧計量法方式、並びに新 JIS ・新計量法方式について解説する。

(a) 旧 JIS ・旧計量法方式

右図のような分光放射照度が波長 λ_1 , λ_2 の範囲で一定な架空の放射を考え、この光 (波長帯の中心波長と帯域幅によって白色光、赤や青の有色光となる) に対する色補正係数の上限・下限値が規定されている。



波長帯 ($\lambda_1 \sim \lambda_2$) と色補正係数の規格値は以下のとおり。(計量法の規格値と JIS AA 級の規格値は同じである)

波長帯 ($\lambda_1 \sim \lambda_2$) (nm)	規格値
400 ~ 760	1 ± 0.02
450 ~ 500	1 ± 0.40
500 ~ 550	1 ± 0.10
550 ~ 600	1 ± 0.10
600 ~ 650	1 ± 0.20
650 ~ 700	1 ± 0.50

(b) 新 JIS ・新計量法方式

まず、6. 3 (2) の (c) の方式により相対分光応答度を規格化する。次に以下の式で誤差計算を行う。計量法の規格値は 8 % 以下であり、JIS の場合は一般形 AA 級が同じ規格値となっている。

$$f_r = \frac{\sum_{380}^{780} |s'_{rel}(\lambda) - V(\lambda)| \cdot \Delta\lambda}{\sum_{380}^{780} V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \times 100 \quad [\%] \quad (6.9)$$

※波長積分の範囲は、JISでは380～780nm、新計量法では360～830nmとなっている。

本式の意味を言葉で表現すれば以下のようになる。

$$f_r = \frac{V(\lambda) \text{ とのズレ分の面積}}{V(\lambda) \text{ の面積}} \times 100 \quad [\%] \quad (6.10)$$

本方式は、 $s(\lambda)$ の $V(\lambda)$ に対する整合性を1つのパラメータで表している点で取り扱いが容易であるが、各波長帯の光に対して照度計の表示値が大きめの値となるか、あるいは小さめの値となるかの見当がつかないといったディメリットもある。

7. 測定結果の表示方法

光電素子単体、受光器などの相対分光応答度の測定結果には、原則として次の事項を記載する。

7.1 試料に関する事項

- (1) 光電素子の種類、形式、メーカー名、素子番号
- (2) 光電素子の寸法（外形、受光部の形状、受光面積）
- (3) 測定日、データ有効期限

7.2 測定条件に関する事項

- (1) 測定機関に関する事項
 - a. 測定機関名
 - b. 測定者名
- (2) 測定環境に関する条件
 - a. 周囲温度・湿度（とくに光電素子の温度）
- (3) 装置に関する条件
 - a. 標準受光器の種類、形式、受光器番号
 - b. 標準受光器の相対分光応答度
 - c. 測定装置の種類、名称及び形式
 - d. 測定波長範囲、波長間隔、波長帯域幅
 - e. 測定装置に使用した光源

7. 3 測定結果

(1) 相対分光応答度（特定波長の値で規格化したグラフ、5 nm又は10 nm間隔の表）

(2) その他

そのた測定結果について必要なことがあれば示す。

7. 4 測定結果の例

光電素子名 : シリコンフォトダイオード ○○○○(形名) ○○○社製 No.○○

光電素子の寸法 : 受光面サイズ 10×10 mm

測定日 : 1995-1-23

データ有効期限 : 測定日より○年間

測定機関名 : ○○○○

測定者名 : ○○○○

周囲温度・湿度 : 25℃ 60%

標準受光器の種類 : シリコンフォトダイオード ○○○○(形名) ○○○社製 No.○○

標準受光器の

相対分光応答度 : (省略)

測定装置 : ○○製○○形分光測光器

測定波長範囲 : 380～780 nm

測定波長間隔 : 5 nm

波長帯域幅 : 5 nm

測定結果 : 波長 応答度
 (nm) (相対値)

380 0.1528

385 0.1513

390 0.1523

・ ・

・ ・

・ ・

・ ・

・ ・

Ⅱ. 解 説

1. 適用範囲

この基準の適用範囲は

(1) 標準器として公的機関等で国のトレーサビリティ体系に従って値付けされたもの（光電素子、現段階では SPD）を用いること。

(2) 測定対象は原則として光電素子単体であるがフォトメータヘッドなどの受光器にも適用できることとした。なお、輝度計などの結像光学系をもった受光器については、一括して扱わず、付属書として別に記した。

なお、波長 250 nm 以下、1150 nm 以上の波長域ではサーモパイル、焦電形放射検出器などを標準器として、他の素子に値付けを行なうことができるので、それについては解説の付録で述べてある。

2. 用語の定義

ここでは本基準に使われている用語の内から 21 語を取りあげて、かなり詳しく定義した。これらの用語の内には JIS 等ですでに定義されているものもあるが、本基準ではここで示した定義で考えることとする。これらの用語の中で (6) の均斉度は 3 種類の定義を示しているが、実際に使用したときは、この内のどの定義によったものか明記しなくてはいけない。なお、この 3 種の均斉度の定義によるそれぞれの値の間にはよい相関が認められている。

3. 測定条件

この項で定めている事項は、主として測定の安定性と再現性を確保するためのものである。分光測定はかなり複雑な操作である上に、使用する機材なども普遍的に規格統一されていないので、操作の方法や機差を原因とする種々の誤差が現れやすい。本章の各項目はこのことを考慮して規定している。

(1) 試料の構造など、(2) 試料の安定性、(3) 周囲温度に関しては本文のとおりであって、いずれも安定性に対する配慮のためである。

(4) バイアス電源

電源の電圧変動に関しては本文のとおりで、とくに光電子増倍管の場合は応答度（感度）が印加電圧（ダイノード電圧）の 3～4 乗に比例して変動するので、電源の安定性は少なくとも 10^{-3} よりよいものを用いる。光電管や光導電素子などの場合は印加する電圧には適正範囲があって、電圧を下げすぎても上げすぎても安定度が低下したり、ノイズが増加したりするので注意が必要である。

(5) 受光面への入射方向と入射ビームの開き角

一般にモノクロメータの出射単色放射は相当に偏光度が大きく、かつ、その度合いが波長によって変化する。とくに回折格子のアノマリー波長の近傍では、わずかの波長変化によって急激に偏光の状態が変動する。したがって、測定試料の分光応答度が偏光度によって影響を受けないようにしなくてはならない。その対策の一つとして斜方向から入る入射を制限して、受光面での反射を減らすようにする。入射の立体角を 15° 以下とする（入射角 7.5° 以下）ことは経験的なデータにもとづくものである。

(6) 照射用光源の安定性

本文のとおりであって特に付け加えることはないが、Xeランプのような放電ランプを用いるときは特に注意すべきである。

(7) チョッピング周波数の安定性

光電流の増幅器にロックインアンプを用い、かつ、雑音低減のために帯域増幅器のQを大きくしたときは、チョッピング周波数の変動が出力に影響する。したがってチョッパを駆動するモータ等の回転数は十分安定にしなければならない。

(8) バイアス光の照射

本文のとおりであるが、照射するバイアス光はその分光分布、放射照度が試料の実際に使用される状態に近いものとする。バイアス光が強すぎて試料が飽和していると、測定が無意味になるので、事前のチェックが必要である。

(9) 外乱からの遮へい

これも常識的なことで本文のとおりであるが、チェックをする際には、測定入力が一番微弱な状態（測定器の利得、感度を一番大きくした状態）で行うことが必要である。

4. 測定設備・器材

4.1 標準受光器

この基準の目的から考えて、必ずしも測定・放射測定を日常業務としていない利用者への配慮から、取扱容易で安定性の十分によいSPDを標準とすることにした。

標準受光器の供給、値付けの種類などについては、値付けを行なっている公的機関に直接照会すること。

なお、研究的な目的や、本文に記した250～1150 nm 以外の波長域で分光応答度の測定を行うときは、標準受光器として受光面に吸収特性が波長に依存しないような放射の吸収材（例えば金黒）を塗布した熱形の検出器（サーモパイル，焦電形検出器）を使用する。しかし、熱形検出器はSPDに比べて一般的に安定性、検出能力が2～3桁以上低いので測定には十分な技術と経験が要求される（解説付録参照）。

分光応答度の受光器標準として推奨されているシリコンフォトダイオード（SPD：S1337-1010BQ など）は安定度の高い固体素子であり、標準電球のように消耗性のあるものでもないもので、一度校正すれば相当長期間使用出来るのではないかと思わ

れているようである。これは一面では当たっているが、可視波長域以外、特に紫外域に対しては全く誤解であると云える。SPDの分光応答度を経時的に測定した結果の一例では、波長450 nm位から短波長側では1～2%/年の経時的な応答度の低下が認められ、その程度は波長が短くなるほど大きかった。これは、Si表面のSiO₂膜の経時変化によるものと考えられ、SPDの使用の有無にはあまり関係がない。従って、使用の有無に関わらず定期的に再校正をする必要がある。

4. 2 分 光 装 置

モノクロメータとしてはプリズム形も存在するが、現在では使用されることが少ないので回折格子形に限ることとした。

回折格子形には光路の形による多くの種類があるが、分光応答度測定の際の重要な要件である、出射単色放射の放射照度の均一性の実現からは、ツエルニー・ターナマウントが最も望ましい。リトロ形、エバート形マウントも使用できるが、リトロ形は出射放射照度の不均一性、エバート形は迷光の混入に、注意すべきである。凹面回折格子を用いたもの（JOBIN YVON H-20など）は出射単色放射の照度分布の不均一性が相当大きいので使用しない方がよい。

モノクロメータの入射、出射のスリット波長幅は、原則として等しくなるようにする。なお、入射、出射のスリット機械幅を等しくしても、スリット波長幅が等しくなるとは限らないので、モノクロメータの取扱説明書などを参照すること。

波長設定、ブレース波長については本文のとおりである。

回折格子モノクロメータには多くの場合、アノマリー（特定の波長域で効率がかなり大きく変動し、それに伴って出射単色放射の偏光度も大きく変化する現象）が存在する。従って、あらかじめアノマリーの波長と、その付近での出射強度の変化状況などを調べておき、極端に変化のある波長を測定点から外しておくか、測定結果に平滑化などの補正を施すなどの処置が必要である。

なお、モノクロメータのFナンバー（コリメータの焦点距離／回折格子の口径）はできるだけ小さいものを用いる。

4. 3 光 源

本文のとおりである。Xeランプは強制空冷した方がよい場合もある。メーカーの取扱説明書などを参照のこと。

4. 4 入射・出射の光学系配置

（1）入射の光学系（集光系）

主要なことは本文に示したとおりである。ここでは実装上の注意点などを挙げておく。

イ）光学系の口径（サイズ）

回折格子の一辺の寸法： D 、コリメータの焦点距離： f_c

集光系から入射スリットまでの距離： l_1

としたとき、集光の光学系（ミラーまたはレンズ）のサイズ（集光光学系が正

方形のときはその一辺の長さ d ，円形のときは直径 d_0 は次のようになる。
(本文(4. 1 式))

$$d \geq D \cdot \varrho_1 / f_c \quad (\text{解 4. 1})$$

$$d_0 \geq \sqrt{2} D \cdot \varrho_1 / f_c \quad (\text{解 4. 2})$$

光学系の収差による出射単色放射の不均一性を少なくするために、口径はできるだけ大きい方がよい。その場合、集光系からの光が回折格子の外へはみ出さないように、集光系の近傍に適当なサイズのしぼり（アパーチャ）を置くとよい。

ロ) 凹面鏡の傾き

本文図 4. 1 (1) に示したように、凹面鏡使用のときは凹面鏡の光軸を θ だけ傾ける必要がある。この θ が大きすぎると光源の像が結像しなくなる。 θ の限度は、凹面鏡の曲率（焦点距離）にも関係するが、 10° 程度である。なお、鏡を傾けたときの横方向の実効的な寸法は $d / \cos 2\theta$ に広がるので注意する。

ハ) 鏡の蒸着面

本文に示したとおりアルミ蒸着面とする。市販されている鏡にはアルミ蒸着面の上に保護膜として MgF_2 等の膜をオーバーコートしたものがある。このようなものの中には紫外域で吸収特性を示して、反射鏡の機能を低下させるものがあるので、紫外域で使用するときには反射率の低下がないことを確認して使用する。

(2) 出射の光学系

(a) 結像系を用いる方法

(b) 拡散面を用いる方法

(c) 光ファイバー束を用いる方法

これらについては本文のとおりである。いずれの場合も、光学系に対する標準、試料の位置の再現性の確保を完全にしなければならない。

4. 5 測定器材の配置

(1) 測定対象（試料及び標準）

本文で述べた保持機能を十分にすると同時に、試料及び標準の位置（特に左右、高さ）を容易に確認できるような、インジケータや治具をあらかじめ用意しておくこと（位置の再現性の保持のため）。

(2) フィルタ、減光板などの配置

フィルタの配置については本文のとおりである。ここでは、用いるフィルタの種類と機能について述べる。

フィルタの役割は二次光をカットし、かつ、測定の全波長域について、標準及び試料への入射の強さ、あるいは光電出力の大きさをできるだけ一定な値に近づけることである。

この目的を達成するために、シャープカットフィルタあるいは広域バンドパスフィルタと減光フィルタ（ニュートラルフィルタ）を組合わせて使用することが多い。
(解表 4. 1)

解表4. 1 分光応答度測定のためのフィルタの組合わせの例

モノクロメータ G-250, 回折格子 1200本/mm, ブレーズ波長 300nm

i) 光源: JC 24V 250W ハロゲン電球

波長域 (nm)	フ ィ ル タ
280 ~ 380	U330 ²⁾
380 ~ 520	B48S ¹⁾
520 ~ 850	Y50 ¹⁾ + ND 0.2 ³⁾

ii) 光源: 150W Xeランプ

波長域 (nm)	フ ィ ル タ
200 ~ 260	200W-1D ⁴⁾
260 ~ 380	U330 ²⁾ + N25*
380 ~ 600	LB-A2 ¹⁾ + CC40Y ³⁾ + IRA-25S ¹⁾ + ND 0.2 ³⁾
600 ~ 850	O-54 ¹⁾ + H50 ²⁾ + M50 ²⁾

- 1) 東芝色ガラスフィルタ
- 2) HOYA 色ガラスフィルタ
- 3) 富士フィルムアセテートベースフィルタ
- 4) ACTON
- * UV用 (石英板に Ni-Cr 蒸着)

実際に光源、モノクロメータ組合せの出射特性を調べてみると、光源にハロゲン電球を使用し、比較的短波長側にブレイズ波長のあるモノクロメータと組合わせたときには、短波長、長波長域で出力が低下し、可視域中央で出力が最大になるようなことが多い。このようなときには、ニュートラルフィルタによる減光を可視域で行うのが一般的である。紫外域については、迷光低減のためにUV用バンドパスフィルタ（U330など）を用いる。（解図4.1）

Xeランプを使用するときは、輝線部分をできるだけ押さえるようなフィルタ（例えば色温度変換フィルタ）や、赤外部の放射（900 nm 以上に極めて強い輝線群がある）をカットするような防熱フィルタを併用する。紫外の250 nm 以下を使用するときは、迷光低減用のUVバンドパスフィルタが必要になる。（解図4.2）

（3）チョッパなどの配置

配置については本文のとおりである。チョッパの周波数は、10 Hz ~ 1 KHz で任意に選ぶ。但し、熱形検出器を用いる予定ならば10~20 Hz とする。チョッパ周波数は電源周波数やその高調波の影響をさけるために、電源周波数の整数倍以外にする。

（4）Ref. 受光器（モニター受光器）を入れる場合

Ref. 受光器の配置は本文のとおりである。Ref. 受光器としては受光器寸法 $6\text{ cm} \sim 10\text{ cm}$ のSPDが適している。Ref. 受光器にはビームスプリッタからの放射以外の迷光が入らないように適当なフードやアパーチャなどを取り付ける。Ref. 受光器への入射の強さは、本文に述べたような石英板ビームスプリッタを用いたときは、標準及び試料への入射の約 $1/10$ であるので、このことを考慮して増幅器等の利得を決める。

但し、ビームスプリッタの反射と光透過光の比は、アノマリー波長付近では相当大きく変動するので、あらかじめ調べておく必要がある。

4. 6 光電出力の増幅器

増幅器として一般的に使用するのは次の機器である。

イ) チョッピング光を用いないときは電流-電圧変換器（IVコンバータ，IVC）

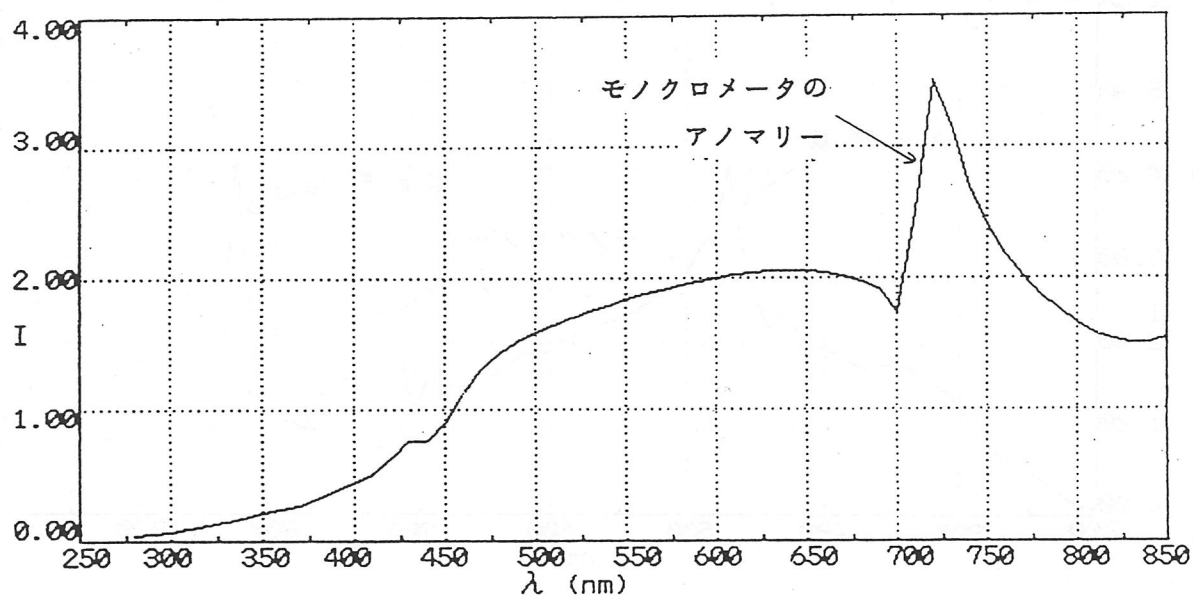
ロ) チョッピング光を使用するときはIVCと同期検波器（ロックインアンプ）。非同期式の交流-直流変換器は低入力での直線性が悪いことが多いので使用しない方がよい。

光電素子はフォトダイオード、光電子像倍管などでは電流出力（負荷抵抗短絡状態）で使用する（IVCの使用で達成できる）。PbSやCdSなどの光電素子の場合はチョッピング光を入射し、負荷抵抗を用い、その両端の電圧信号を取り出す。負荷抵抗の値は光導電素子の暗抵抗とほぼ等しくする。このときはIVコンバータは用いず、ロックインアンプへ直接入力する。この場合、負荷抵抗とロックインアンプの入力抵抗が並列になるので、その効果を考えて負荷抵抗の値を選ぶ。場合によっては高入力抵抗の前置増幅器（プリアンプ，Zコンバータ）を用いる。

解図4. 1 ハロゲン電球を照射光源としたときの光電出力の例

モノクロメータ: G250, SPD: S1337 1010BQ

イ) フィルタなし

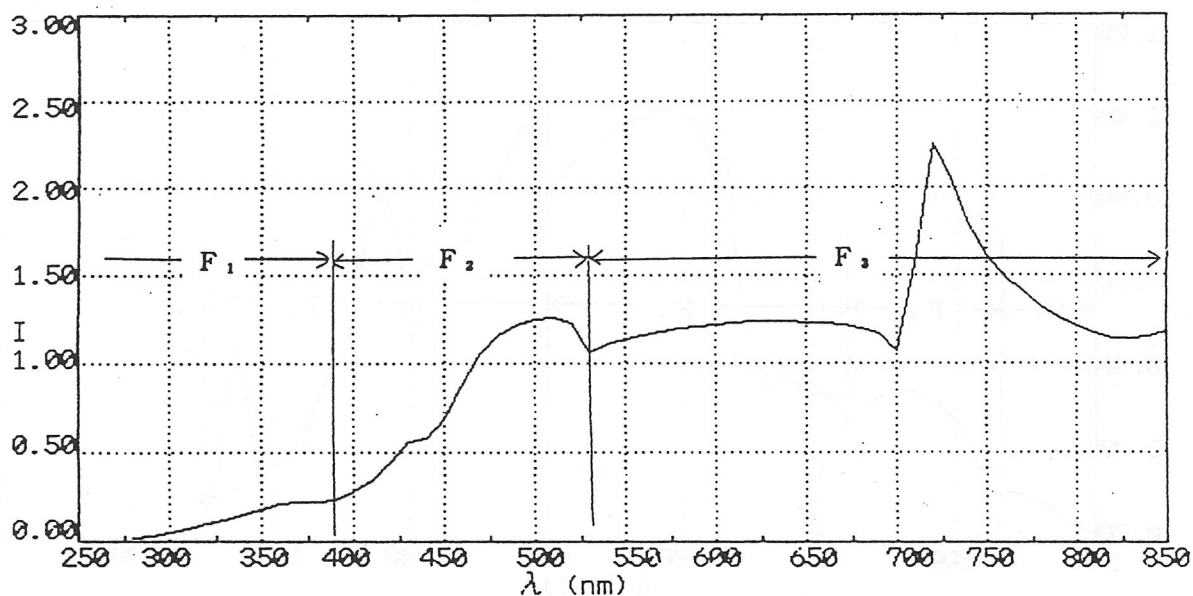


ロ) フィルタ付き

F_1 : U330

F_2 : B48S

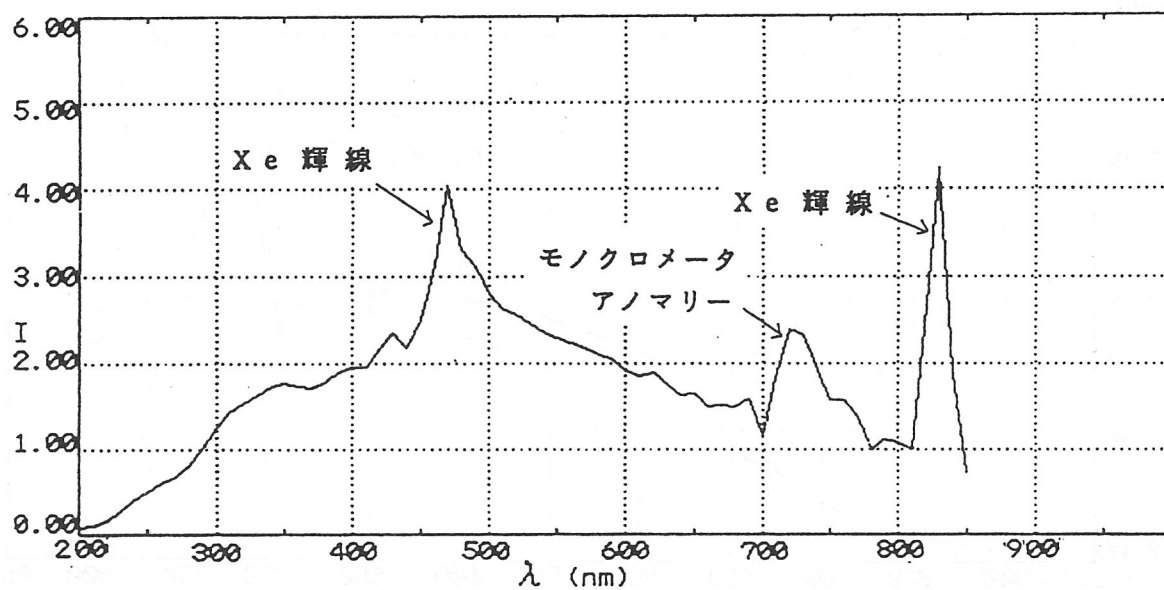
F_3 : Y50 + ND 0.2



解図4.2 Xeランプを照射光源としたときの光電出力の例

モノクロメータ: G250, SPD: S1337 1010BQ

イ) フィルタなし



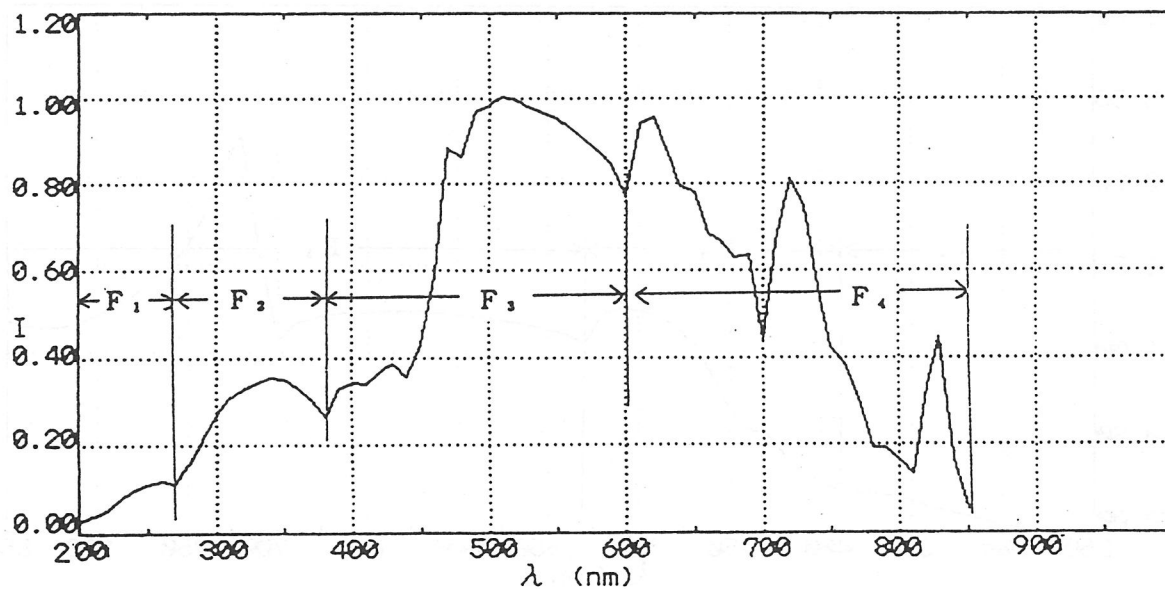
ロ) フィルタ付き

F_1 : 200W-1D

F_2 : U330 + N25

F_3 : LB-A2 + CC40Y + ND 0.2 + IRA25S

F_4 : O54 + HA50 + M50



(1) ダイナミックレンジ

本文に示したとおりである。これは IVC , ロックインアンプをすべて含めたときである。光電流が大きいと、増幅系の途中で出力の飽和が起ることがあるので予備測定を行ってチェックする必要がある。

(2) ノイズ・ドリフト

チョッピングを行わないで、IVC の出力をそのまま利用するときは (DC 直結機器であるため)、ゼロ点の経時的なシフトが起りやすく、レンジ切換によってもゼロレベルが変動するのでよくチェックする。

(3) 応答速度

本文のとおりである。チョッピング光を用いるときは、光電素子自体の応答がチョッパの周波数に十分追従することを確認する。

4. 7 その他の測定支援系

- (1) 光学ベンチ, キャリア, ステージ等は機械的に安定で、装置などをしっかり固定できるものを用いる。
- (2) 標準, 試料を遮光するためのハウジングは電磁シールドと兼用にできると都合がよい。また、位置調整や試料交換のために、開閉できる窓を側面と後面に設けておく。
- (3) コンピュータシステムとインターフェースについては本文のとおりである。改修等を考えてある程度余裕をもっておく。ADC のサンプリング時間は 0.1sec 程度とるのがよい。

4. 8 測定の支援環境

本文のとおりである。

5. 測定方法

分光応答度測定の基準としては、広い波長範囲で分光応答度が一定な熱型検出器を使用するが、検出能力が低く応答時間が長い。この技術基準では取扱いの利便性、他機関とのデータの整合性を考慮し、公的機関で校正されたフォトダイオードを標準受光器として使用することにした。

シリコンフォトダイオードの分光応答度は紫外から近赤外まで広範囲に亘っている。光電出力は微弱光から強い光照射に対し直線性がよく、且つ安定性が優れているため標準受光器に適したセンサである。

本章の各項目は各種受光器の分光応答度を測定するさいの、標準受光器との相対比較の方法について記述したものである。

5. 1 標準及び試料のマウント方法

受光器の取り付けについては本文に記述されているとおりであって、再現性の維持と位置設定の微調整が可能にようにする。

5. 2 波 長 設 定

本測定法は測光、測色のための受光器の分光応答度の測定方法に主眼を置いているため、測定波長間隔は5 nmまたは10 nmとしている。一般に光電検出器の分光応答度は細かな凹凸がなく滑らかな曲線になる。したがって波長精度はそれほど心配することはない。しかし検出器によっては入射窓に狭帯域干渉フィルタが取り付けられているものがある。このような検出器の分光応答度測定は波長精度を厳しく管理する必要がある。また干渉フィルタの特性から、入射角によって分光応答度が変わるため注意が必要である。

測定波長間隔は入射光源が輝線スペクトル（Hg ランプ等）の場合などは必ずしも等間隔にできないことがある。

5. 3 出射単色光の受光面への入射

受光器への放射照度が高ければ出力も大きくなり、測定はしやすくなる。したがって入射光を集光し出射スリットから出射される単色光の放射照度を高くすることが一般的に行われる。このとき注意しなければならないのは、受光面の寸法、形状の異なる標準及び試料の両受光器を測定評価するとき、十分均斉度のよい拡散光を受光面に照射することである。このためにモノクロメータの出射スリットの直後に視野レンズ及び拡散板を設けることが一般的である。

5. 4 高次光の遮断と迷光の低減

回折格子モノクロメータの出射光には固有の特性として、設定波長の単色光放射に整数分の一の波長成分がふくまれる。例えば波長 600 nm に設定したときその出射光に 300 nm（2 次光）、200 nm（3 次光）……の高次光成分が含まれる。これを除去するために設定波長と 2 次光波長の間に遮断点のあるシャープカットフィルタを光路に入る。

5. 5 迷 光 の チ ェ ッ ク

モノクロメータを使用するとき、迷光に対する考慮は大変重要である。迷光の発生原因及び補正方法は本文に記述したとおりである。迷光は測定誤差を生じる原因の一つで光学系から極力除去することが望ましい。例えばダブルモノクロメータを用いれば迷光は大幅に減少する。

迷光が含まれるときは迷光成分を評価して、これを補正しなければならない。もし、補正量が10%以上になるような場合には、光源や入射光学系を再検討する。

5. 6 測 定 の シ ー ケ ンス

本章の個々の項目については本文に記載したとおりである。全体として次の点に留意する必要がある。

モノクロメータの出射スリットと受光器の間に光学系を設けるときには、光学系の機械的安定性、再現性の維持及び微調整ができるようにすることが大切である。

5. 7 そ の 他

本文のとおりである。

6. 測定データ処理

この項では、分光応答度を求める基本式、実用測定器で行われているオフセット処理や光源の変動補正、さらにデータの誤差評価、分光応答度データの規格化、 $V(\lambda)$ 受光器の性能評価方法について述べている。

6. 1 相対分光応答度の求め方

分光応答度を求めるための基本式は(6. 3)式で与えられるが、モノクロメータを含む光学系の分光透過率や光源の分光分布が影響しないかという疑問を持つ人もいるはずである。そこでここでは、分かりやすいように(6. 1)式及び(6. 2)をあえて記載し、これらの影響は比較測定によって、キャンセルされることを示した。

(1) オフセット処理

光電素子に入射する光を完全に遮断しても、光電出力は必ずしもゼロにはならない。この時の出力を暗出力(オフセット)という。暗出力を含んだままでは、光電出力に誤差が生ずるため、測定した生データから減算する必要があることを示した。

(2) 光源の変動補正

標準受光器測定時と試料受光器測定時の間に光源に出力変動があると誤差の原因となる。これを防ぐために光源変動をモニタし補正する一般的な考え方を示した。

6. 2 迷光の推定と補正

シングルの回折格子モノクロメータを用いる場合には、前述した高次光と迷光が問題となる。これらを押さえるための基本的な手法を示した。

6. 3 データの誤差評価と規格化(正規化)の方法

(1) 測定の不確かさの評価

相対分光応答度測定データの誤差は、波長精度、標準受光器のもつ誤差、光源のドリフト、試料受光器の非直線性などの要因による誤差が累積されるので、総合精度を見積もるのは難しい。ここでは、測定の再現性による有効桁の評価及び測定値の不確かさの考え方と表示について述べた。

(2) データの規格化(正規化)

データの規格化(正規化)について、(a) 分光応答度のピーク値で規格化する方法、(b) 測定全域の平均値で規格化する方法、(c) CIE の標準の光 A、及び $V(\lambda)$ により規格化する方法、の 3 通りを示した。(c) は $V(\lambda)$ 受光器に適用される特殊な方法であるが、照明学会には密接な関係をもっていること、最近、JIS 及び計量法が改正されたこと、などを考えて詳細に説明した。

6. 4 その他

(1) 色補正係数

色補正係数の概念を示すとともに、相対分光応答度の規格化が(6. 6)式で行

われていれば、単色光に対する色補正係数の計算が極めて簡単になることを示した。

(2) $V(\lambda)$ 受光器の性能評価

$V(\lambda)$ 受光器として最も広く使用されているものは照度計である。照度計の性能を規定するものとして、JIS 規格 (JIS C 1609「照度計」) 及び計量法があるが、1993年に大幅に改正されたため、新旧の規格について分かりやすく説明した。

(3) 光電検出素子または測光ヘッドの分光応答特性の誤差評価の考え方

分光応答特性 $S(\lambda)$ の応答度の値の確からしさは、一般に応答度が高いときが良好で、応答度が低くなると (例えば短波長端や長波長端) 低下する。この確からしさをどのように要求するか、あるいは評価するかは、使用目的によっても異なるので一律に定め難い。そこで、代表的な考え方を列記して、そのどれを用いるかは、目的と状況に応じて判断することとしたい。以下に考え方を列記する。

(a) 相対誤差 (% 誤差) を全波長域で一定値に規制する評価

$S(\lambda)$ の全波長範囲または $S(\lambda)$ の値を限定した波長範囲 (例えば $S(\lambda)$ が最大値の10%以上である波長範囲) で、 $S(\lambda)$ に対する許容誤差 (または $S(\lambda)$ の確からしさ) が一定のパーセンテージ (例えば $\pm 2\%$) 以内に入ることを要求する評価規準である。この考え方は、分光応答度の評価規準としては最もきびしいものであるが、分光応答度標準に用いる光電素子では、 $S(\lambda)$ の値が、 $S(\lambda)$ の大きさ、あるいは波長にかかわらず、ある確からしさの水準を維持しなければならないので、このような評価をとらざるを得ない。

しかし、 $S(\lambda)$ が非常に小さいときにも、このことを要求するのは技術的に無理があるので、前述のように $S(\lambda)$ が最大値の10% (または5%) 以上になる範囲のような限定が必要になる。

測定した $S(\lambda)$ に対して、別に基準となる分光応答度 $S_0(\lambda)$ (例えば $V(\lambda)$ など) があるときには、 $S(\lambda)$ の基準値 $S_0(\lambda)$ に対する波長ごとの相対偏差 $dr(\lambda)$ (%) を (解6. 1) 式で求めて、それが、あらかじめ定めた許容範囲 (パーセンテージ) に入っているかどうかを比較する。

$$dr(\lambda) = \left(1 - \frac{C_1 \cdot S(\lambda)}{S_0(\lambda)} \right) \times 100 \% \quad (\text{解6. 1})$$

ここで C_1 は $S(\lambda)$ の波長的積分 (波長ごとの値の総和) を $S_0(\lambda)$ の波長的積分と等しくするための規格化係数である。

$$C_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (\text{解6. 2})$$

(b) 絶対誤差（誤差の絶対量）を全波長域で一定値に規制する評価

$S(\lambda)$ の値のいかんにかかわらず $S(\lambda)$ に対する許容差（または確からしさ）が一定の絶対量 k （例えば $k = \pm 0.02$ ）以内になることを要求する評価規準である。

この方法では、例えば $S(\lambda)$ の最大値 $S(\lambda_0)$ に対して、 $S(\lambda_0)$ の 0.02 倍の量 t_e を許容差と定めれば、 $S(\lambda)$ の値が $S(\lambda_0)$ の $1/10$ になっても、 t_e は同じであるので、許容差のパーセンテージは $S(\lambda)$ の逆数に比例して広がることになる。つまり、 $S(\lambda)$ の値が小さくなるに従って相対誤差（パーセント誤差）の許容範囲が広がることになる。測定した $S(\lambda)$ に対して、別に基準となる分光応答特性 $S_0(\lambda)$ （例えば $V(\lambda)$ など）があるときには、 $S(\lambda)$ の $S_0(\lambda)$ に対する偏差 $d_e(\lambda)$ は（解 6. 3）のようになる。

$$d_e(\lambda) = C_1 S(\lambda) - S_0(\lambda) \quad (\text{解 6. 3})$$

ここで C_1 は（解 6. 2）式で求めた規格化係数である。

$d_e(\lambda)$ を波長ごとのパーセント誤差 $d_r(\lambda)$ (%) に換算すると次のようになる。

$$d_r(\lambda) = \frac{d_e(\lambda)}{S_0(\lambda_0)} \times 100 \% \quad (\text{解 6. 4})$$

ここで $S_0(\lambda_0)$ は基準になる分光応答度の最大値である（ $S(\lambda)$ と $S_0(\lambda)$ の近似性がよいときは $S(\lambda_0)$ を用いてもよい）。

この考え方は、 $S(\lambda)$ の有効波長範囲で、連続的でしかも、あまり変化の大きくないような発光源の波長的な積分量を評価するような場合には合理的である（たとえば照度計で電球光の照度を評価するときなど）。しかし、比較的応答度の小さい波長域で、波長域が限定された帯スペクトルの発光（あるいはその複合）を評価するときなどには不適当である。

(c) 応答度の大きさによる重みを付けた相対誤差評価

これは (a) と (b) の中間的な考え方である。その一例として J I S C 1609-1983（照度計の旧規格）では、波長 450~700 nm を 5 分割して、分割した波長範囲について、それぞれ異なったパーセンテージで許容差を与えている。つまり、波長によって許容差に重み付けをしている。しかし、この方法では重みが段階的になり、連続量として $S(\lambda)$ を評価すると、重みが不連続になって境界域で不都合が生じる。そこで、波長に対して許容差のパーセンテージが連続的に変わり、それが測定理論の上から合理性を持つような考え方の一つを提案する。この考え方は $S(\lambda)$ の許容誤差または確からしさに対する重み $W(\lambda)$ を次式のようにする。

$$W(\lambda) = \sqrt{\frac{S_0(\lambda)}{S(\lambda)}} \quad (\text{解 6. 5})$$

したがって許容誤差（相対値） $\varepsilon_r(\lambda)$ は次のようになる。

$$\varepsilon_r(\lambda) = W(\lambda) \cdot k \times 100 \% \quad (\text{解 6. 6})$$

このときに測定対象の $S(\lambda)$ に対して、別に基準的な値 $S_0(\lambda)$ (例えば $S_0(\lambda) \equiv V(\lambda)$ など) が定められていれば、それに対する偏差 $d_r(\lambda)$ は (解 6. 1) 式で求め、これを (解 6. 6) 式の $\varepsilon_r(\lambda)$ と比較して評価する。

重み $W(\lambda)$ を (解 6. 5) のようにする根拠は次のとおりである。一般に光電検出器のような素子では、出力信号のゆらぎ (ノイズ) 成分は、出力の振幅の平方根に比例することが知られている (ノイズがランダムに発生するためである)。したがって、雑音の増加 (減少) 割合が許容誤差の範囲に比例するようにすれば、応答に対する評価として最も合理性があることになる。解図 6. 1 に $V(\lambda)$ に対する (a), (b), (c) による重みを計算して示す。

7. 測定結果の表示方法

測定結果の表記内容は使用目的によって変わることが多い。ここでは測定結果の確度の維持のために、測定上必要と考えられるデータを下記に列記した。光電素子の測定結果の表示は、必要に応じて下記内容の中で取捨選択をすればよい。

7. 1 試料に関する事項

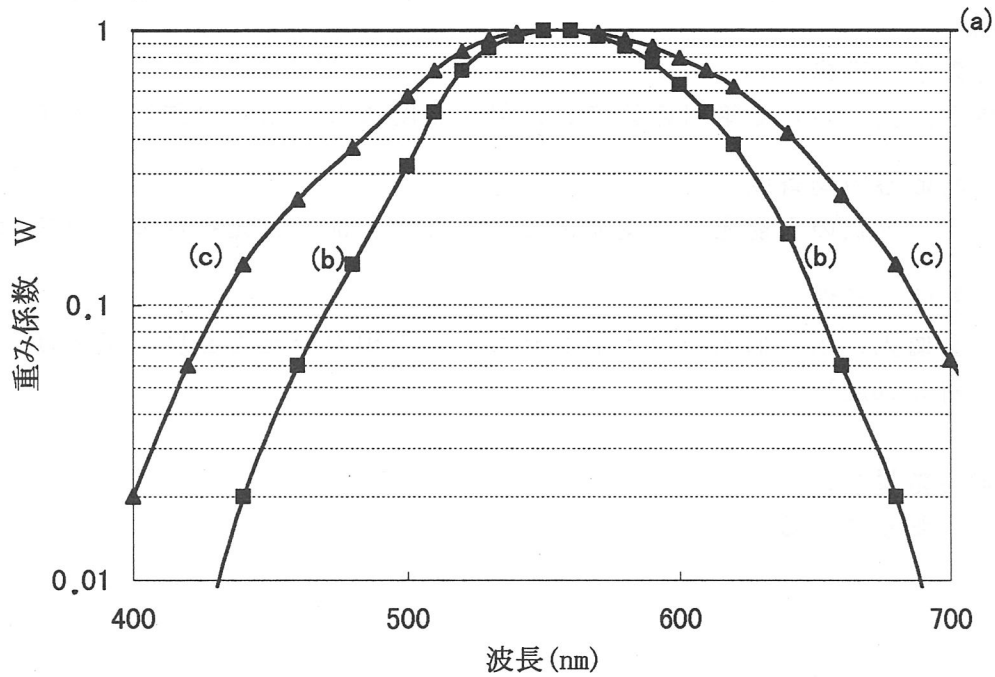
- (1) 光電素子の種類、形式、メーカー名、素子番号 (素子番号は使用者が独自に設定してもよい)
- (2) 光電素子の寸法 (外形、受光部の形状、受光面積)
- (3) 測定日、データ有効期限

7. 2 測定条件に関する事項

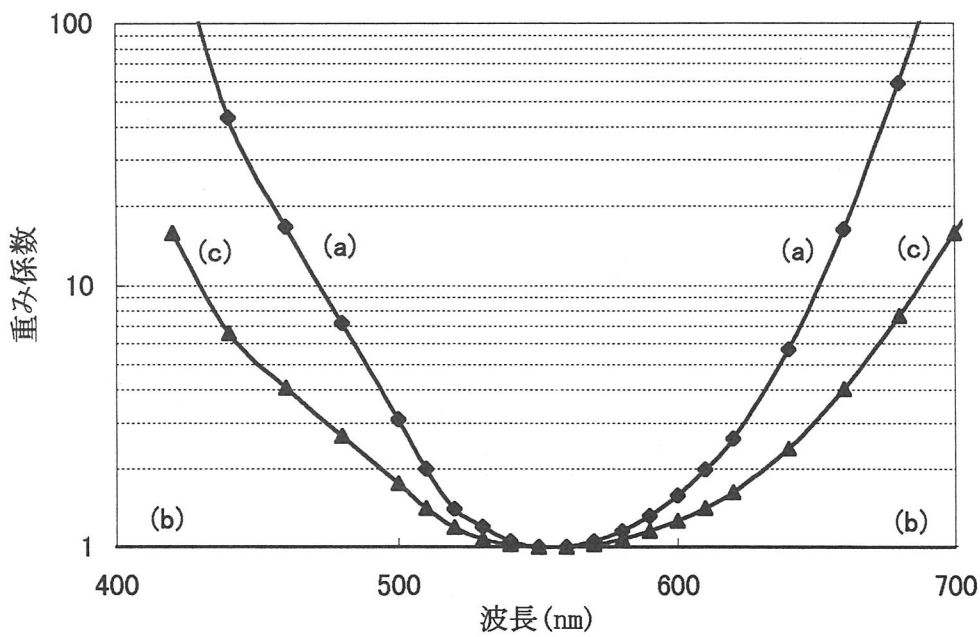
- (1) 測定機関に関する事項
 - a. 測定機関名
 - b. 測定者名
- (2) 測定環境に関する条件
 - a. 周囲温度・湿度 (とくに光電素子の温度)
- (3) 装置に関する条件
 - a. 標準受光器の種類、形式、受光器番号 (受光器番号は使用者が独自に設定してもよい)
 - b. 標準受光器の相対分光応答度
 - c. 測定装置の種類、名称及び形式
 - d. 測定波長範囲、波長間隔、波長帯域幅
注) 波長帯域幅とは、モノクロメータから出射される単色光の実効的な幅を波長の単位で表したもの。出射単色光の最大強度が二分の一となる波長を、短波長側および長波長側で測り、その波長幅をとると近似値が求められる。
 - e. 標準受光器の校正の時期および方法、その他

解図 6. 1 $V(\lambda)$ を対象とした誤差の評価

- 1) 誤差評価(a)を基準としたときの値(偏差)を (b) 、 (c) に換算する重みの値



- 2) 誤差評価(b)を基準としたときの値(偏差)を(a) 、 (c) に換算する重みの値



7. 3 測定結果

(1) 相対分光応答度

(特定波長の値で規格化したグラフ、5 nm または 10 nm 間隔の表)

(2) その他

光電素子の定格

(特定波長における絶対応答度、入射光強度または出力の許容最大値)

受光面応答の均斉度

(スポット状の入射光で、受光部を走査して各部の分光特性の違いを示したもの)

斜入射時の特性

(垂直偏光、水平偏光を斜入射させたときの相対分光応答度。例えば、法線方向に対し 30 度)

7. 4 測定結果の例

本文のとおりである。

解 説 の 付 録

250 nm より短い波長、1150 nm より長い波長における相対分光応答度の測定について

本体で規定したように、この規定の適用波長範囲は、公的機関から供給される標準受光器の波長目盛の250 nm から1150 nm までである。しかし、状況によってはこの波長範囲外（特に250 nm 以下の短波長）での分光応答度の測定が要望されるので、その方法について略記する。これらの波長域でも測定の基本的な考え方と手順は本体に示した事項と全く同じであり、異なるのは標準受光器とその増幅系及び若干の光学系のみである。

1. 波 長 250 nm 以 下 の 測 定

波長250 nm 以下の測定限度は波長200 nm までである。これ以下の波長には大気の吸収があるため、通常の装置では使用できない。また、使用できる一般的な光学材料は透過面では合成石英、 CaF_2 、 BaF_2 、反射面ではAl 蒸着面である。

1. 1 標 準 受 光 器

熱形放射検出器（サーモパイル，焦電形放射検出器）を使用する。受光面に良質な黒化材料（金黒など）が塗布してあるものを用いて、相対分光応答度が波長に対して一定であるとみなして使用する。熱形検出器は検出能力がシリコンフォトダイオードよりも3桁以上劣り、ドリフトも大きいので、入射をチョッピングして、ロックイン検出を行なう必要がある。面積の大きいサーモパイルを用いるときは、チョッピングが困難なので直流的な検出を行なうが、このときには一回のよみの前後で必ず暗出力のチェックを行なってドリフトを補正する。

増幅器は専用のものを用いる（検出器のメーカーなどへ照会するとよい）。

なお、短波長側（波長 200 nm まで）については、外国製品（UDT社など）もあり、アメリカのNIST（旧NBS）でも波長200 nm までの値付けを行なっているので、それらを利用することもできる。

1. 2 分 光 装 置

ブレイズ波長200～250 nm の回折格子モノクロメータを用いる。回折格子の格子定数は 1200本/mm 以上が望ましい。これはできるだけスリット機械幅を広くして出射のパワーを大きくするためである。帯域幅は5～10 nm とする。

1. 3 光 源

75～300W のXe ランプ又は水冷形（100～200W）の重水素ランプを用いる。Xe ランプを使用するときには長波長側の放射が強いので、適当な短波長紫外用のブロードバンドパスフィルタ（ACTON社 などで製作している）を用いるか、迷光補正を行なう。但し、熱形検出器の迷光補正は低いレベルではゆらぎが多くて困難である。

1. 4 入 射 光 学 系

本体の図4. 1の(1)のミラー系を用いる。レンズ系は色収差が大きく、補正が難しいので使用しない方がよい。

1. 5 出 射 光 学 系

本体の図4. 2の(a)の結像系を用いる。熱形検出器は検出能力が低いため、拡散面は使用できない。結像の状態は結像面に蛍光シート（漂白材の入った紙など）を置いてチェックすることができる。

(c)の光ファイバー束は紫外透過性のよい材料で、短いものを用いれば使用できる可能性がある。

1. 6 そ の 他 の 事 項

その他に関してはすべて本体に記したとおりである。短紫外域の測定は低レベル入射となって再現性が悪くなるので、熱形検出器を用いた測定は、多数回の測定を行なって統計処理をする必要がある。

2. 波 長 1150 nm 以 上 の 測 定

波長1150 nm以上の分光応答度の測定限度は使用する分光装置の分光効率で決まるが、波長の下端を可視域におくならば、2～3 μm が限界になる。モノクロメータ（分光器）の種類によっては、複数個の回折格子を切換えて使用するものもあるので、3個程度の切換えができれば波長10 μm 程度までの測定ができる。但し、この間には大気中の H_2O 、 CO_2 などの吸収によって、測定が困難であるか、又は吸収に伴うゆらぎのために測定精度が低下する波長域がかなり存在する。

ここでは、常識的な測定波長限度が2.5 μm 程度であると考えて記述する。

2. 1 標 準 受 光 器

250 nm以下の紫外域と同様に熱形放射検出器を使用する。この場合も相対分光応答度が波長に対して一定であるとみなして使用する。しかし、熱形放射検出器の受光面に塗布された黒化材（金黒など）の中には、可視・紫外域では良好な吸収性を示しても、赤外域では吸収性が悪くなるものがあるので、何らかのチェックをすることとが望まれる。熱形放射検出器の分光応答度は受光面の分光吸収特性と強く関連することが知られているので、適当な方法で、測定波長域における受光面の（相対）分光吸収（又は反射）特性を測定するとよい。反射測定の条件は $0/45^\circ$ 又は $0/d$

（JIS Z 8722）でよく、標準反射面は硫黄粉末の圧着面がよい。反射光の検出器としてはPbS光導電セルが使用できる。モノクロメータの使用が難しければ、数種のパンドパスフィルタを使用してもよい。

赤外域で使用する放射検出器は、ほとんどがチョッピングを必要とするので、熱形放射検出器もチョッピングして使用する種類のものを用いるのがよい。

2. 2 分 光 装 置

近赤外域を対象とするときには、ブレース波長 $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ，回折格子の格子定数 $600 \sim 300 \text{本/mm}$ 程度の回折格子モノクロメータを使用すれば、波長 $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の測定ができる。帯域幅は $10 \sim 20 \text{ nm}$ で使用する。2次光カットのためのシャープカットフィルタは必ず使用する。

2. 3 光 源

測定波長範囲を可視域から近赤外域とするときは、ハロゲン電球を使用する。JC 24V 150~250W程度のもので使い易い。Xe ランプも使用できるが、 800 nm 以上には非常に強い輝線があって使いにくい。ハロゲン電球の使用波長限度はほぼ $2.5 \mu\text{m}$ である。これよりも長波長側の光源としては SiC 発熱体、ニクロム線ヒータなどを用いる。加熱温度は $900 \sim 1200 \text{ K}$ である。

2. 4 入 射 光 学 系

本体図 4. 1 の(1)又は(2)を使用する。レンズとして、ガラス又は石英を使用すると、長波長限界は $2.6 \mu\text{m}$ 程度である。これよりも長波長で使用できる透過材料は ZnSe, BaF₂, Ge, Si などである。

2. 5 出 射 光 学 系

本体図 4. 2 の(a)の結像系を使用する。拡散面は標準受光器の検出能力が低いため使用できない。結像状態のチェックには2次光又は3次光を使用する。例えば波長目盛 $1.1 \mu\text{m}$ なら波長 550 nm の2次光が結像する。

(c)の光ファイバー束は赤外透過性の良いものを選べば、使用できる可能性がある。

2. 6 そ の 他 の 事 項

(1) 測 定 対 象

波長 $2.5 \mu\text{m}$ までならば測定の対象は Ge-PD, InGaAs-PD, PbS セルなどであろう。Ge, PbS は、応答の温度係数が大きいので一定温度に保ち又は冷却して使用する。

(2) フ ィ ル タ

長波長側で、分光装置の効率、光源の放射パワーが低下するので、高次光の混入を防ぐシャープカットフィルタを必ず使用する。波長 $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の測定ならば遮断波長がそれぞれ $0.8 \mu\text{m}$, $1.4 \mu\text{m}$ 付近にある2枚のシャープカットフィルタを用いて切替える。

(3) 吸 収 バ ン ド

波長 $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の間には、波長 $1.3 \mu\text{m}$, $1.8 \mu\text{m}$ 付近に水蒸気 (H_2O) による吸収がある。光路が短いときにはこの吸収はそれ程大きくないが、高湿度のときには注意する必要がある。 $2.5 \mu\text{m}$ 以上では $2.5 \sim 3.3 \mu\text{m}$ に H_2O の強い吸収があり、 $4.3 \mu\text{m}$ 付近に CO_2 の強い吸収がある。

Ⅲ. 付属書1 輝度計の相対分光応答度測定方法

1. ま え が き

本体に述べた受光器などの分光応答度の測定方法を応用して、レンズ系などの光学系と、光電検出素子、フィルタなどを組合わせた輝度計やそれに類似した測光機器（例えば「色彩輝度計」と称されているような装置）の相対分光応答度を測定することができる。

本付属書ではその方法について述べる。

輝度計の一般的な性能評価法については照明学会技術指針 JIEG-006 (1986)「輝度計の性能評価方法ならびに使用法」が刊行されているので、基本的な概念や用語などについてはそれに従って記述する。

2. 輝度計の相対分光応答度の測定条件

輝度計（色彩輝度計なども含む）の相対分光応答度 $S(\lambda)$ は、次のように測定する。

- (1) 適当な単色光出射装置（モノクロメータと白色光源の組合わせ）から、分光放射輝度率（方向を指定した分光反射率）が波長に対してほぼ一定とみなせる拡散反射面に、単色光を照射する。このときの、拡散反射面上の単色光の放射照度の均斉度（むら）はできるだけ少なくすること。
- (2) 拡散反射面への単色光の入射角はほぼ 0° （法線方向）とし、単色光ビームの開き角は 15° 以内とする。
- (3) 測定する輝度計の光軸は、拡散面を照射する単色光の光軸に対して約 45° の開きを持つこと（付図1）。
- (4) 輝度計のピントは拡散面上に完全に合せる。
- (5) $S(\lambda)$ の値は対象とする輝度計と標準受光器（本体4.1参照）を波長ごとに比較して、各波長ごとの応答を求めて、次式で算出する。

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) \frac{D_x(\lambda)}{D_R(\lambda)}$$

ここで、 $S_0(\lambda)$ は標準受光器の分光応答度、 $D_x(\lambda)$ は試料の測定波長ごとの出力、 $D_R(\lambda)$ は標準受光器の測定波長ごとの出力である。

- (6) 標準受光器への入力は、拡散面上で輝度計が見込む測定面積（輝度計の測定視野に対応する発散面積）と同じ面積から、輝度計の光軸と同じ開き角（(3)参照）をとって与えること。

3. 測定機材など

3.1 標準受光器

本体4.1に述べたものを用いる。波長 250～1150 nm で値付けされたシリコンフォトダイオードである。

3.2 分光装置

本体4.2に述べたものを用いる。回折格子形モノクロメータである。

3.3 光源

本体4.3に述べたものを用いる。通常は、ハロゲン電球を用いる。

3.4 入射・出射の光学系配置

(1) 入射の光学系

本体4.4(1)に述べたものを用いる。

レンズ、ミラー等のピントと光軸は十分よく調整して、出射側の単色光の放射照度の均斉度を十分よくすること。

(2) 出射の光学系

2の(2)(3)(6)の条件を満足させるために、付図1の光路A又は光路Bに示す光学系のいずれかを用いる。

(a) 光路 A

この光路では投影レンズ Q_1 でモノクロメータの回折格子の単色像を拡散面 D_r 上に投影する。このときの単色像の面積は、輝度計の測定視野面積 (20～50φ) に対応するようにする。 D_r には、輝度計の測定視野の輪郭にほぼ対応する開口のマスク (アパーチャ) を付ける。輪郭の形は 長径/短径 約1.4の横長の楕円である。 D_r からの発散光は入射の光軸をはさんで、同じ出射角で、輝度計と標準受光器へ入射する。

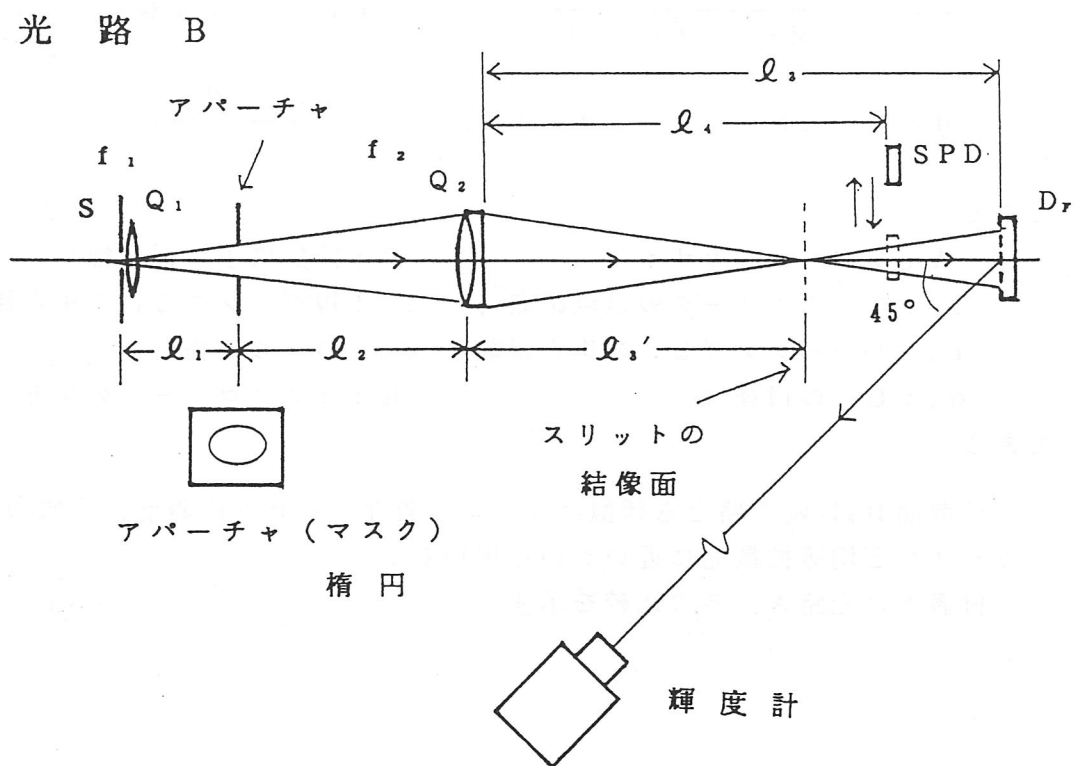
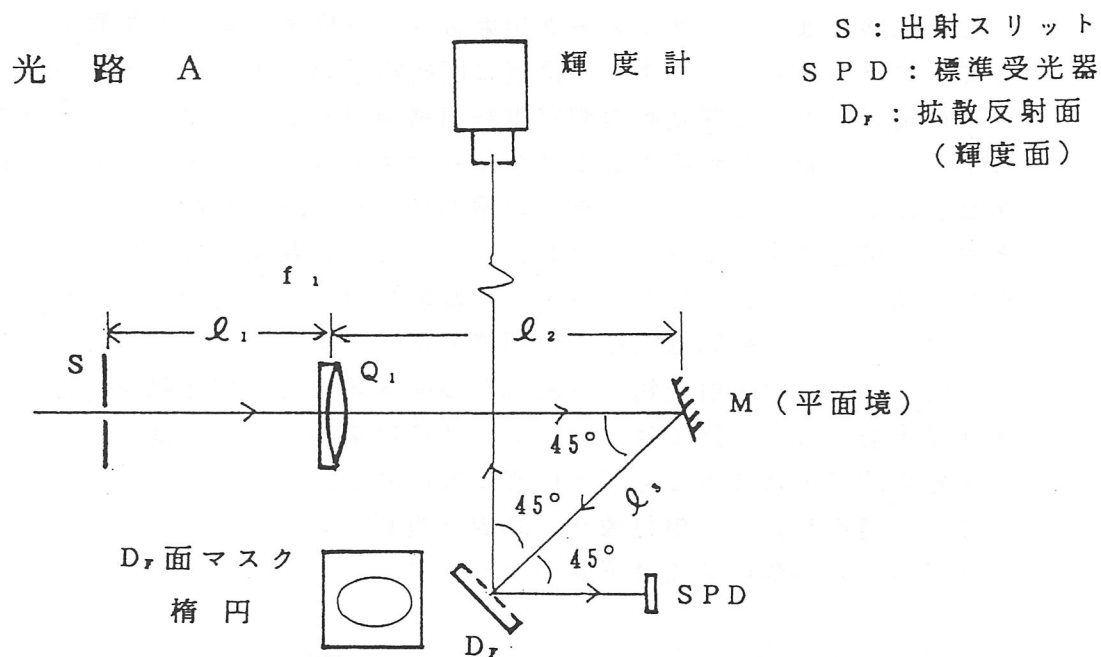
D_r 上に投影される単色像のサイズ (幅) W と投影レンズ Q_1 の口径 d 、及び光路中の距離は次のようになる。

$$W \approx G \frac{f_1}{f_c}, \quad \ell_2 + \ell_3 = f_1$$

$$d \geq 1.2 G \frac{\ell_1}{f_c}, \quad \ell_1: \text{任意}$$

ここで G : 回折格子の径 (幅), f_c : モノクロメータの焦点距離,
 f_1 : 投影レンズの焦点距離
である。

付図 1 輝度計 $S(\lambda)$ の測定光路（出射側）



(b) 光 路 B

この光路は前記技術指針 J I E G-006 に示されたものである（但し、原文には視野レンズ Q_1 はない）。

この光路では、モノクロメータ出射スリット直後に置いた視野レンズ Q_1 によって、アパーチャ（マスク）の位置に回折格子の単色像を結像する。このアパーチャの輪郭によって輝度計の測定視野面積が決まる（アパーチャ位置を前後にずらすことで、測定視野の大きさはかなり変えられる）。次にリレー（投影）レンズ Q_2 によって、このアパーチャの輪郭像を D_r 上に投影する。リレーレンズをとった単色光束（ビーム）は D_r の手前で一旦収束して出射スリットの結像を作り、発散して D_r 上にアパーチャの輪郭で絞られた回折格子の単色像を投影する。アパーチャの輪郭は光路 A と同様の楕円とする。

輝度計は D_r の入射光軸から約 45° の開き角をとって光軸を設定して測定する。標準受光器はこの光路ではリレーレンズの収束面と D_r の間で、ビーム径が標準受光器の開口とほぼ等しくなる位置に設置する。

この光路の D_r 上の単色像サイズ W と視野レンズ Q_1 、リレーレンズ Q_2 の径、及び光路中の距離の関係は下式のようになる。

$$W = A \frac{\ell_2}{\ell_1}, \quad A = G \frac{\ell_1}{f_c}$$

$$f_1 \approx \ell_1, \quad f_2 = \frac{\ell_2 \cdot \ell_1}{\ell_2 + \ell_1}$$

$$L_3 = \frac{f_2 (\ell_1 + \ell_2)}{\ell_1 + \ell_2 - f_2}, \quad L_4: \text{標準受光器の口径で決まる}$$

$$d_1 \geq 1.2 h, \quad d_2 \geq 1.2 G \frac{(\ell_1 + \ell_2)}{f_c}$$

ここで

A : アパーチャのサイズ,

G : 回折格子の径（幅）,

f_c : モノクロメータの焦点距離, f_1 : 視野レンズ Q_1 の焦点距離,

f_2 : リレーレンズ Q_2 の焦点距離, d_1 : Q_1 の口径,

d_2 : Q_2 の口径,

h : モノクロメータのスリットの高さ

である。

拡散面 D_r は両光路とも硫酸バリウム圧着面、ハロン圧着面、良質のオパールガラスなど均等拡散面に近いものを用いる。

付表 1 に光路 A, B の比較を示す。

付表1 輝度計 $S(\lambda)$ の測定用光路の比較

	A	B
長所	1. 標準と輝度計の読みが並行してとれるので、波長走査が1回ですみ、経時的変動（光源などの）に強い。 2. 輝度計をモノクロメータの光軸と直交又は平行にした配置ができるので測定しやすい。 3. 拡散面の分光反射率を考えなくてよい。 4. 出射側のレンズが1個なので測定面の放射照度の均斉度がよくなる。	1. 標準受光器に十分な放射が与えられる。 2. スリットの結像面から後の光路は、ビームの広がりに関わらず、放射照度の均斉度がよいので、標準の開口径、輝度計の視野面積に対する自由度が大きい。また、ビームの径はアパーチャの前後位置で調整可能。
短所	1. 標準SPDへの入射が弱くなり S/N が劣化する。（直射の $1/100$ 位に低下） 2. 拡散面にマスクをかけないと、輝度計では測定していない周辺の光が、標準SPDに入る。	1. 波長走査を標準受光器、輝度計で個別に行なう必要があるので光源の安定性が重要。 2. 輝度計の光軸がモノクロメータの光軸に対して約 45° になるので配置しにくいことがある。 3. 結像レンズに比較的大口径のものが必要。 4. 拡散面の分光反射率の影響が入る可能性がある。

3. 5 測定機材の配置

(1) 輝度計の配置

輝度計は安定な測定架台（3脚など）に取付け、上下、左右位置の微調整、光軸の仰俯、旋回の微調整ができるようにする。付図2に測定角をパラメータとした、測定視野サイズ（幅）と測定距離の関係を示す。

なお、実際の測定視野の幅は D_f 上に投影する単色像（アパーチャ）の幅の約0.7倍になることに注意する。

(2) フィルタ、減光板などの配置

本体4. 5（2）に示すとおりで、原則として入射側に入れる。

(3) チョップパなどの配置

ロックイン検出をするときには、チョップパは原則としてモノクロメータの入射側に入れる。出射側に入れるときは、光路Aなら投影レンズとモノクロメータの間、光路Bならリレーレンズの前又は後に入れる。

(4) 標準受光器の配置

周囲からの迷光（散乱光）が入らないように十分遮光して、安定に設置する。光路Bでは位置の再現性が保てること。

3. 6 光電出力の増幅器

本体4. 6に述べたものを用いる。輝度計には多くの場合、外部出力端子があるので、これを利用できる。

3. 7 その他の事項

本体4. 7, 4. 8に述べたとおりで、遮光、温度変動に注意する。

4. 測定方法

4. 1 輝度計と標準受光器のマウントの方法

本付属書3. 5（1）,（4）に述べたとおりである。

4. 2 波長設定

輝度計の場合は次のとおりとする。

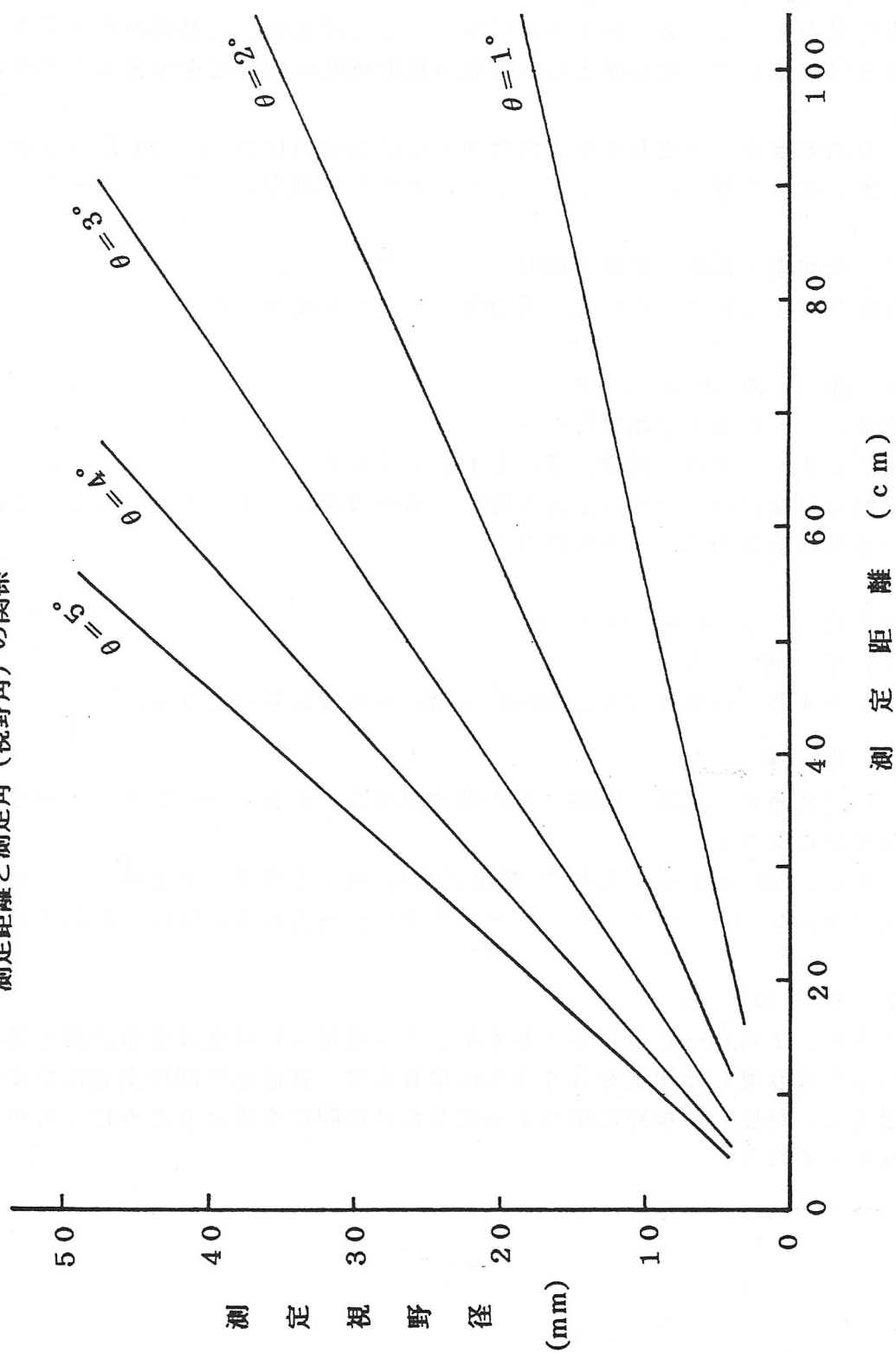
(1) 測定波長範囲 : 360~830 nm

(2) 測定波長間隔 : 5 nm

(3) 波長帯域幅 : 5 nm（本体5. 2（3）参照）

輝度計以外のものでは、測定波長範囲は目的に応じて設定し、波長間隔と波長帯域幅は上に準ずる。

付図2 輝度計の測定視野角 θ をパラメータとした
測定距離と測定角（視野角）の関係



4. 3 拡散面への照射

本付属書 3. 4 (2) のように行なう、この際には、入射側の光学系のピント、光軸を十分調整して、拡散面上の単色光の放射照度の均斉度を十分よくしなければならない。

なお均斉度は、受光面径が、拡散面上の単色像の径の $1/10$ 以下の受光器を拡散面が置かれる位置(面)で上下、左右に走査して測定することができる。

4. 4 高次光の遮断、迷光の低減

本体 5. 4 に示すとおりで、適当なフィルタを使用する。

4. 5 迷光のチェック

本体 5. 5 に示す手順で行なう。

迷光のチェックは、標準、試料とも必ず行なうこと。

試料の輝度計については上記の他に、本付属書 5. 4 (4), (5) に述べる、紫外、赤外の応答のチェックを行なう。

4. 6 測定の手順

(1) 光路 A

この光路では波長ごとに 標準/試料 の直接比較ができる。

(2) 光路 B

この光路は、標準、試料ごとの単独個別波長走査しか行なえないので、光源は十分安定に保つ。

もし、Ref. 受光器を入れて 参照/試料 測定を行なうときは、リレーレンズの前又は後にビームスプリッタ(ハーフミラー)を入れて、Ref. へ入射させる。

4. 7 その他

本体 5. 7 に述べたとおりであるが、この測定では輝度計を単色像を投影した拡散面からかなり離れた配置をとるようになるので、拡散面や試料受光器のまわりは十分に遮光し、輝度計の視野に相当する部分だけに開口を設けるようにしないと、迷光が入りやすくなる。

5. 測定データ処理

5.1 相対分光応答度の求め方

本体 6.1 及び本付属書 2 (5) に述べたとおり、標準と試料の応答の比較値から求める。

5.2 迷光の推定と補正

本体 6.2 に述べたように、シャープカットフィルタを用いて迷光成分を推定して補正する。

5.3 データの誤差評価と規格化（正規化）の方法

(1) 測定の不確かさの評価

本体 6.3 (1) に述べたとおり有効桁数を考慮して、不確かさを見積もる。

(2) データの規格化（正規化）

本体 6.3 (2) に述べたとおりで、通常はピーク値又は平均値で規格化する。複数回の測定の比較のための正規化は平均値で行なう。なお、測定対象が輝度計のときは 6.3 (2) (c) の方法を併用するとよい。

5.4 性能の評価方法

(1) 輝度計の色補正係数

本体 6.4 (1) に述べたとおりで、照度計の場合と同様に行なう。

(2) 輝度計の性能評価法

本体 6.4 (2) (b) に述べたとおりである。 $V(\lambda)$ との整合性を評価の対象として JIS C 1609 の f_s 値による。

(3) 等色関数などを測定対象とした装置の場合

JIS Z 8724 に示された次の方法で評価する。

$$t \leq \left| \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} \overline{f}(\lambda)}{\sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)} \cdot S(\lambda) - \overline{f}(\lambda) \right|$$

ここで $S(\lambda)$ は測定装置の相対分光応答度、 $\overline{f}(\lambda)$ は XYZ 表色系における等色関数 $\overline{x}(\lambda)$, $\overline{y}(\lambda)$, $\overline{z}(\lambda)$ 又は X_{10} , Y_{10} , Z_{10} 表色系における等色関数 $\overline{x}_{10}(\lambda)$, $\overline{y}_{10}(\lambda)$, $\overline{z}_{10}(\lambda)$ の値である。

t の値は測色器としての許容差を示す値で、付表 2 (JIS Z 8724 の表 1) に示してある。

(4) 紫外域に対する応答のチェック (J I E G-006)

FL20SBLB 蛍光ランプ (ブラックライト蛍光ランプ) を定格電流で水平点灯して、管中央部からの発光を HOYA U-340 フィルタ又はこれと同等の分光透過特性をもったフィルタをとおして測定した値と、FL20W 蛍光ランプ (白色蛍光ランプ) を同様な条件で点灯して、管中央部からの発光を測定した時の値 (すなわち輝度値) を比較する。但し、両測定での輝度計のレンジ及び測定角は同じとする。

$$\text{紫外の応答} \quad f_{uv} = \frac{L_{tuv}}{L_{o1}} \times 100 \%$$

ここで、

L_{tuv} : U-340 フィルタをとおして輝度計で測定した FL20SBLB 蛍光ランプからの放射に対するよみ

L_{o1} : FL20W 蛍光ランプの輝度の値である。

(5) 赤外域に対する応答のチェック (J I E G-006)

分布温度約2856Kの電球で照射した白色拡散面 (付属書1の3. 4で示した拡散面) について、HOYA IR-80 フィルタ又はこれと同等の分光透過特性をもったフィルタをとおして測定した値と、フィルタをとおさずに測定した値 (輝度値) を比較する。

$$\text{赤外の応答} \quad f_{ir} = \frac{L_{tir}}{L_{o2}} \times 100 \%$$

ここで、

L_{tir} : IR-80 フィルタをとおして輝度計で測定した拡散面からの放射に対するよみ

L_{o2} : 拡散面の輝度の値である。

これらの紫外、赤外に対する応答の限度値は現在では定められていないが、赤外域については J I S C 1609 にならって、2%以下とすべきであろう。紫外域については実績がないので値を記すことはさけるが、赤外と同等以下にすることが望まれる。

6. 測定結果の表示方法

本体7に示したフォーマットにより、照度計などとはほぼ同様に表示する。但し、「受光素子」は輝度計 (又は××輝度計)、「光電素子の寸法」は測定角に読み変える。

付表 2 等色関数に対応した分光応答度を持つ測色器の t の値 (JIS Z 8724)

等色関数の種類	波長範囲	許容限界 t
$\overline{x}(\lambda)$	500 nm 以下	0.10
	500 nm 以上	0.15
$\overline{y}(\lambda)$	全波長域	0.10
$\overline{z}(\lambda)$	全波長域	0.40
$\overline{x}_{10}(\lambda)$	500 nm 以下	0.10
	500 nm 以上	0.15
$\overline{y}_{10}(\lambda)$	全波長域	0.10
$\overline{z}_{10}(\lambda)$	全波長域	0.40

Ⅳ．付属書 2 遮光材料，フィルタについて

1. はじめに

本体に説明されている受光器分光応答度測定光学系は、光源、分光器、検出器、結合光学系により構成されている。これら光学系においては主として、必要な光を透過、反射、回折させる素子を使用しているが、これらに加えて、不要な光を阻止する光学材料として遮光材料、光学フィルタも使用している。

このような遮光材料、光学フィルタ等の光学材料について、分光応答度測定に使用する上で考慮すべき特性を以下に述べる。

2. 遮光材料

分光器、試料室の内部の壁面においては、反射率の低い素材を使用しむやみに光が反射されることを防ぐ必要がある。通常、黒色の布、塗料、紙等が使用されている。それらは、黒色であるので目視による可視波長範囲では反射率が低いことを示しているが、紫外、近赤外そして赤外波長領域においての反射率は、分光反射率測定結果から判断しなければならない。

遮光材料として使用するには、測定する波長範囲（本測定では 200nm - 1200nm）で反射率が低いことが必要である。いくつかの黒色材料の反射率を測定した結果を示す。

このような遮光材料においては、拡散反射と鏡面反射についても考慮する必要がある。物体色を示す拡散反射が低く黒色にみえるものでも鏡面反射が高いものは使用できない。例えば、黒色塗料において、艶消しで無い場合は鏡面反射成分が高く、遮光材料としては使用できない。

測定データからはいずれの素材も、目視による可視波長領域の判断のみで遮光材料としての適正を判断することは危険であることが示されている。

2. 1 黒色布

布の黒色染料は有機合成染料を使用するものが多い。種類によっては近赤外波長領域において、反射率の高いものがあるので使用に際しては、注意を要する。ビロード布は可視波長範囲では低い反射率を持つが、近赤外波長領域では反射率が高い。（図 1 参照）

黒色布はいずれも拡散性が高く、鏡面反射について考慮する必要は無い。布目の粗いものは、外部光が透過することがあるので、その場合は数枚重ねて使用する等の考慮をする必要がある。

2. 2 黒色紙

ビロード紙はビロード布と同様、可視波長範囲では低い反射率特性を示すが、近赤外波長領域においては急激に反射率が高くなり、本測定に使用することはできない。

ラシャ紙の反射率は赤外域でもほぼ一定(6%)であり、本測定に適している。

内面反射防止材ファインシャットSPの商品名で販売されているものはポリウレタンシート表面に凹凸の加工をしたもので広い波長範囲で低い反射率を持っており、良好な遮光材料といえる。しかし製品によっては、反射特性が大きく異なるので充分注意する必要がある。(図 2 参照)

強い光があたったり、温度の高くなる場所では燃えることも考えられるので本測定においては、放射束の少ない分光器出射側でしか使用できない。

2. 3 黒色塗料

黒色塗料は、カーボン系の顔料を使用しているものが多いので、全波長領域で反射率が低い。しかし塗料の種類、塗装の方法によっては、高い鏡面反射率を持つ場合があるので艶消しの度合い等には充分注意する必要がある。鏡面反射、入手の容易さ等も考え判断すると、アサヒペン耐熱艶消し黒色塗料が、最も推奨できる黒色塗料である。(図 3 参照)

2. 4 メッキ

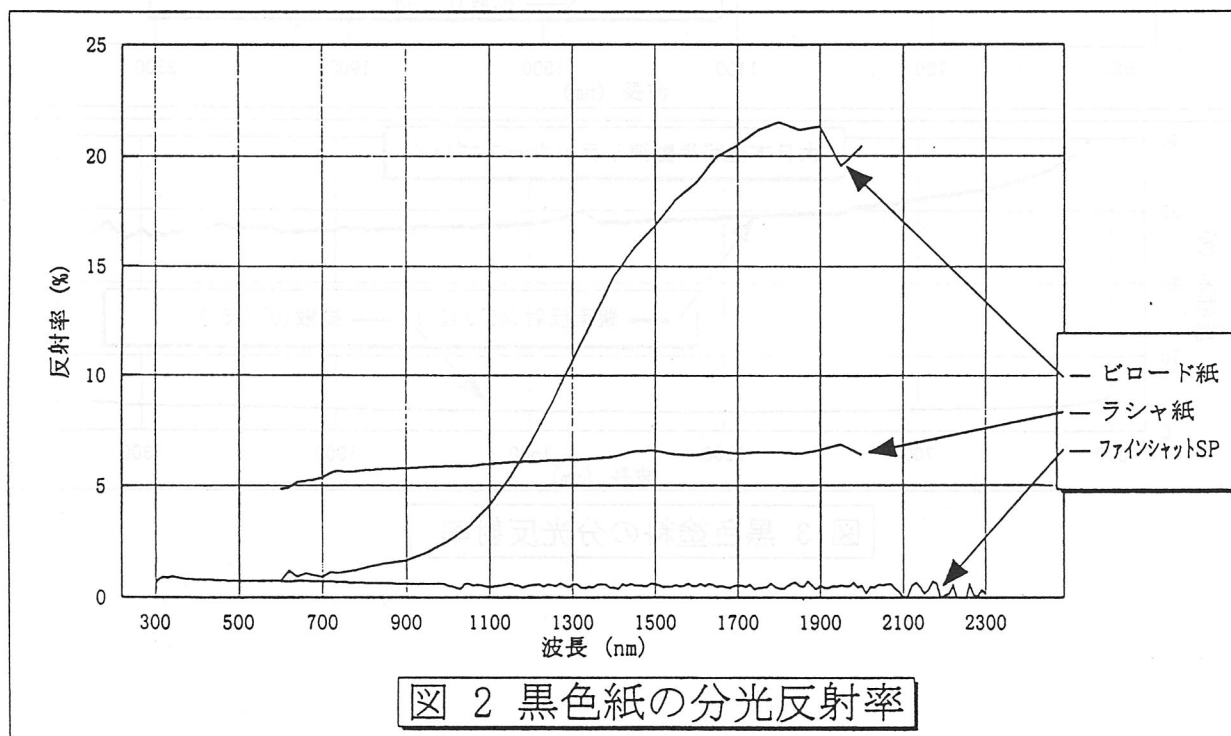
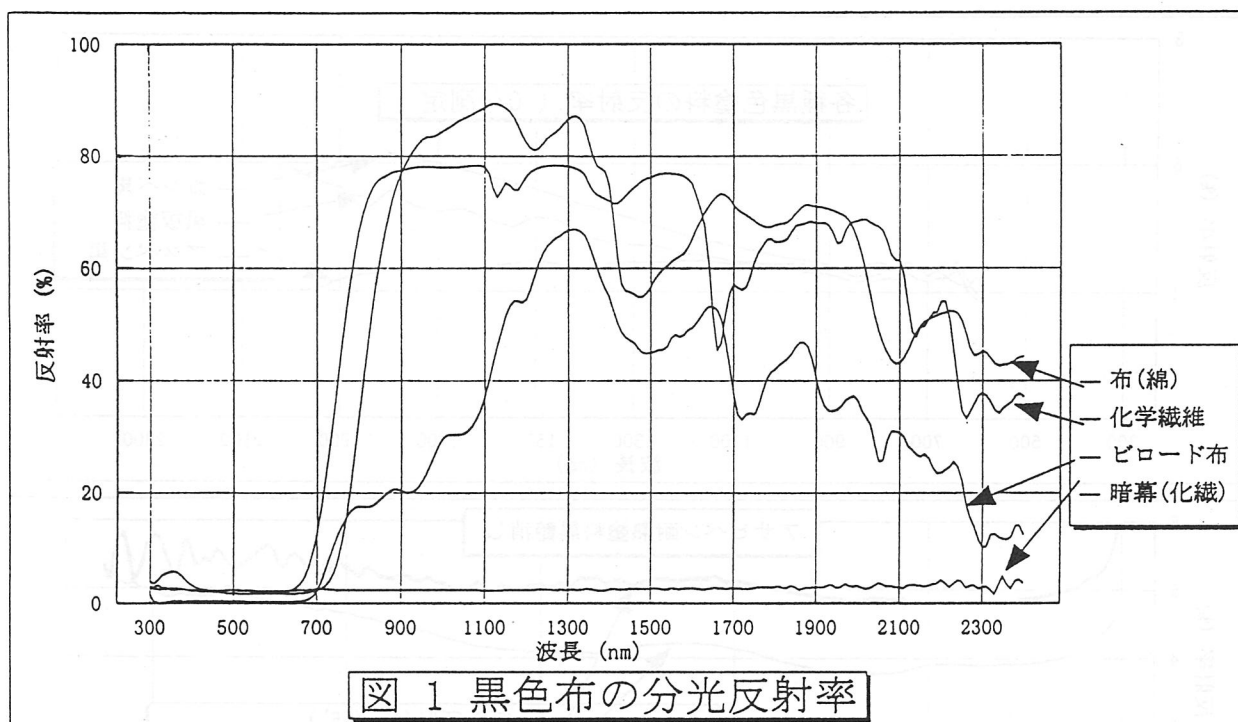
アルミ表面の黒アルマイト(黒色酸化メッキ)は近赤外領域において、高い反射率を持っている。また鏡面反射率も高く、メッキ膜厚による干渉の影響も受け、これを無反射処理の目的で使用することはできない。この処理をした場合は、この表面に必ず黒色塗料による塗装を施す必要がある。(図 4 参照)

鏡面反射の測定は、ハロン圧着面を100%反射基準とし、法線から45°方向の光のみを測定しているので、測定値が100%を越える場合がある。

NiP黒は広い波長範囲で最も安定して、低い反射率(0.2-0.3%)を示しており最良の遮光材料である。これは、絶対放射計の光吸収ヘッド部分として使用されているものである。一般的なものではないので容易に使用することはできないが、その製作方法については文献に詳細に報告されている¹⁾。

2. 5 遮光材の反射により測定誤差が発生した例

検出器の分光応答度測定を行う場合は、試料である光検出器周辺にマスク等の遮光を施す必要があるが、使用する素材によっては、測定値が影響を受けることがあり、このような例が本研究会でも報告された。検出器に密着して45°のエッジをもつマスクを使用した例では、黒アルマイトの、表面に関西ペイント艶消しウレタン塗装を施してあるが、鏡面反射が図 5-1 のように高くなっている。このような状況下では、マスクの有る場合と無い場合では、近赤外の分光応答度のみが高くなり最大値で正規化すると図 5-3 のように可視波長領域で感度が低下したようなデータが得られた。



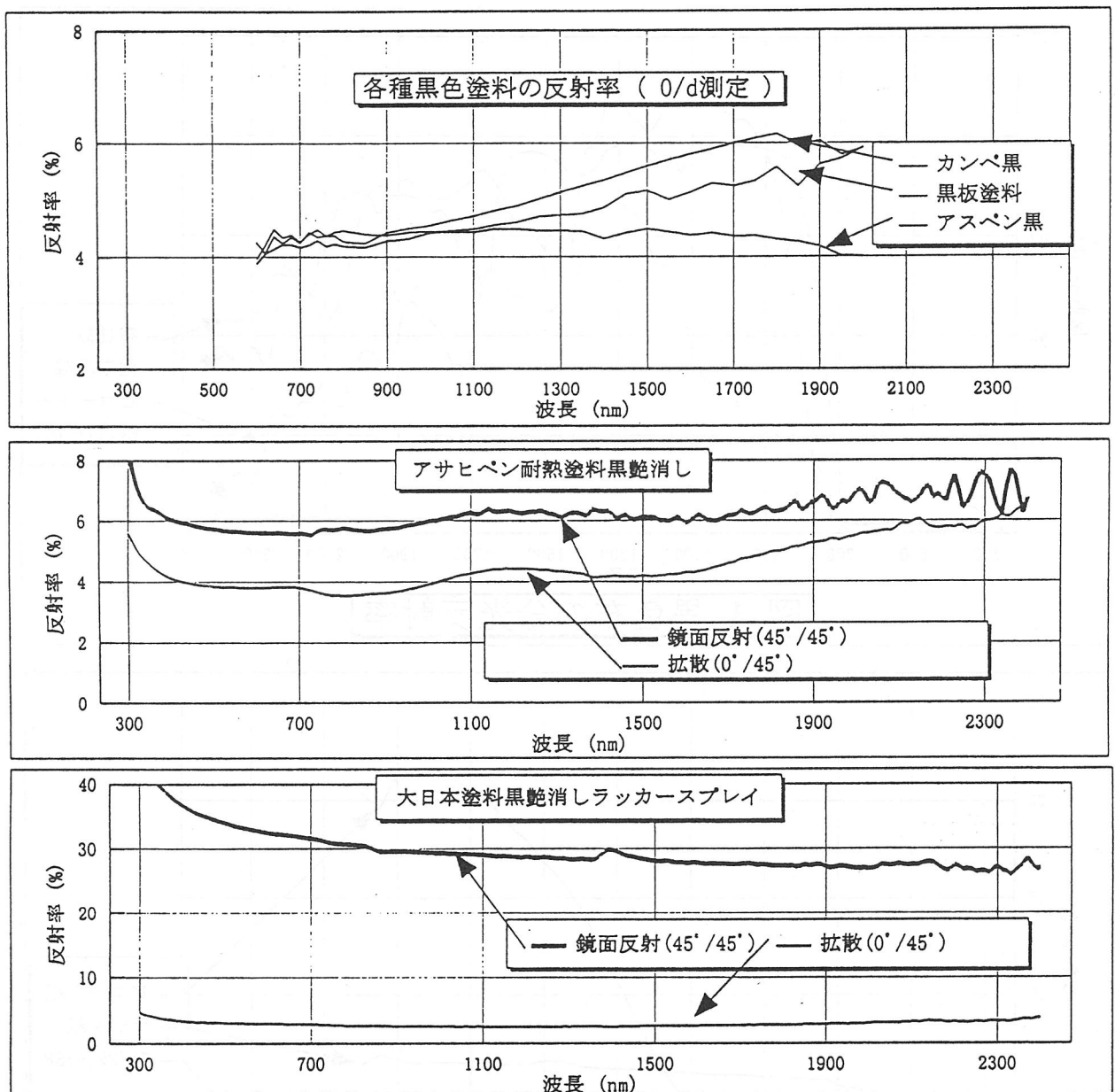


図 3 黒色塗料の分光反射率

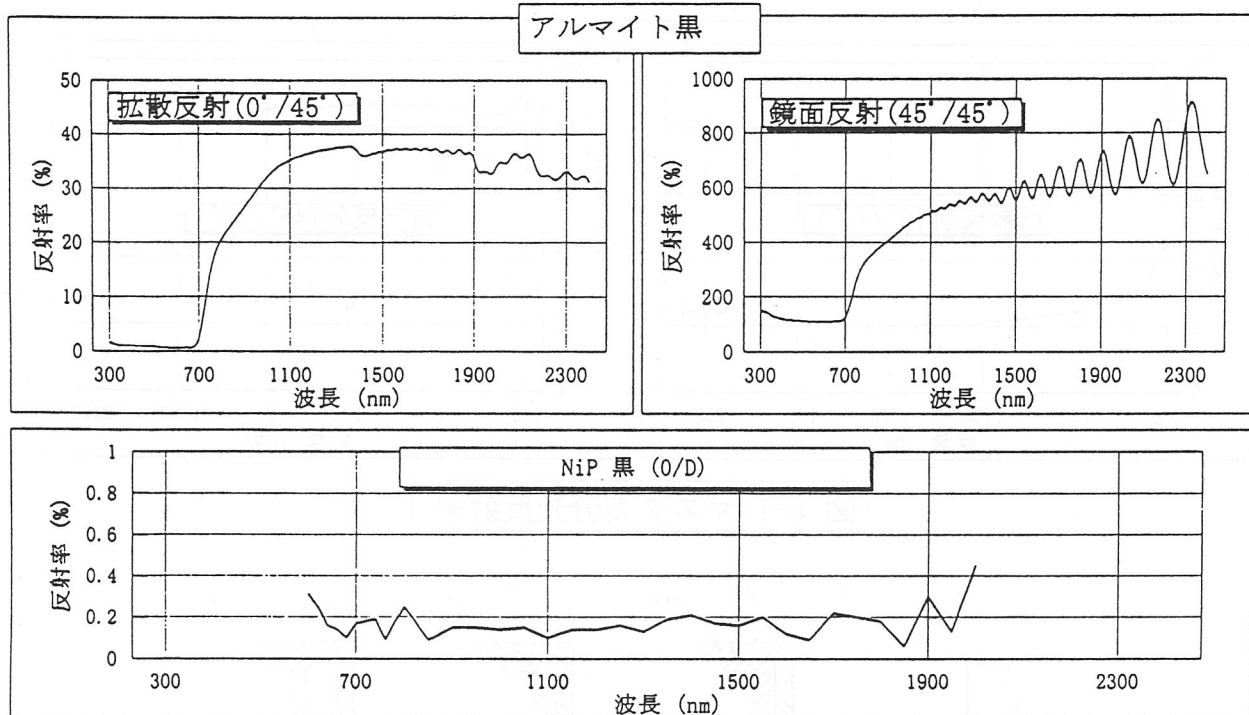


図 4 メッキ処理の分光反射率

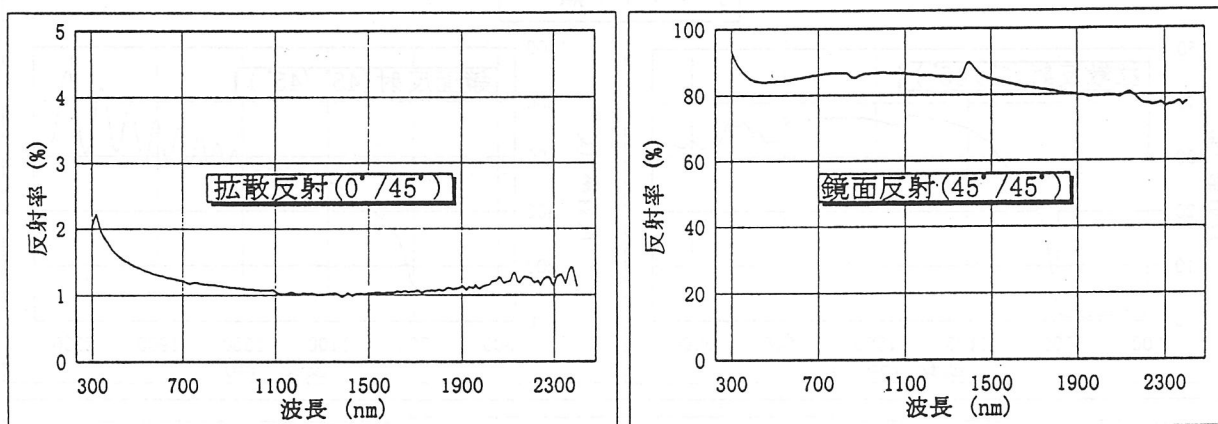


図 5-1 マスクの分光反射率

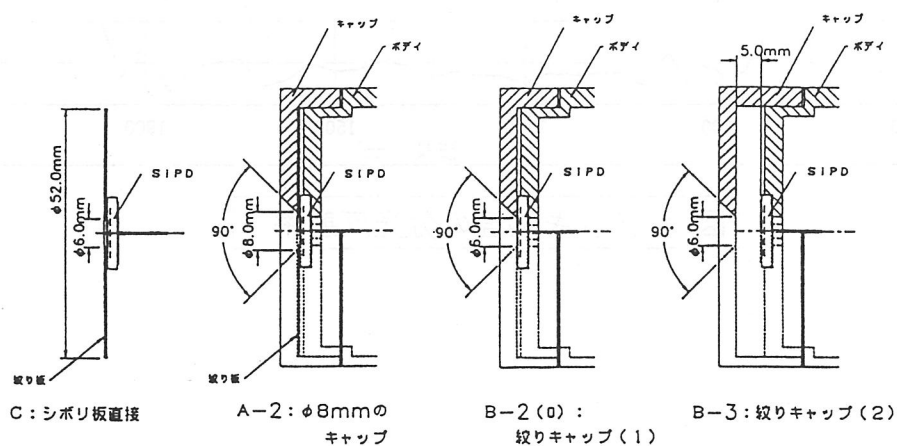


図 5-2 マスクの形状および、受光器との位置関係

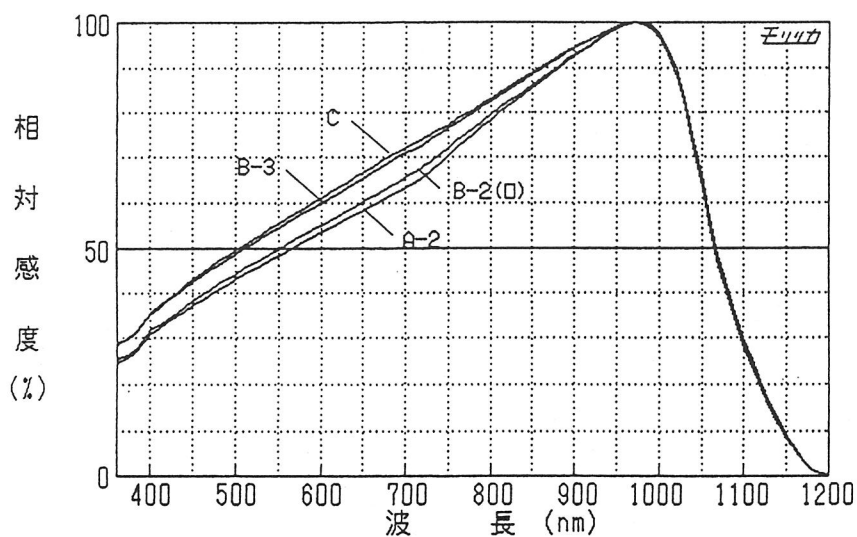


図 5-3 分光応答度測定データ

3. フィルタ

不必要な波長の光を反射または吸収することにより阻止するために、色ガラスフィルタ、干渉フィルタが使用されている。これらのフィルタに関しては多くの資料が発表されているので参考にされたい^{2, 3, 4, 5, 6, 7)}。

本測定に関連して使用上注意すべき点が多くあり、問題となる点について以下に記す。

3. 1 色ガラスフィルタ

透明基材に金属塩等の着色剤を入れ、特定の分光透過率特性をもたせたもので、主として短波長を遮断するシャープカットフィルタを中心とした製品が多く、回折格子分光器の2次回折光をカットする目的でも使用されている。このタイプのフィルタの多くは 250 - 1150nm の波長範囲で使用される。分光装置に使用するためには分光透過率特性の他に下記の点に充分留意する必要がある。

(1) 大気中での劣化

色ガラスフィルタのうち、ある種類のものは、空気中の水分、化学物質により表面に水酸化物等が生成されて白濁等の変化を起こし、透過率や透明度が低下する。このような特性を、耐水性、耐酸性の 2つのパラメータ (Dw, Da) により製品毎に表示しているメーカーもある⁸⁾。この性質は、紫外域、シアン青、熱線カットフィルタの中の特に光学的性能の優れた色ガラスフィルタに多いので気を付ける必要がある。(表 1 参照)

このようなフィルタについては、コーティングをすることによりその劣化を防止することが可能であり、既にメーカーにおいて防湿コーティングを施した製品も販売されている。本測定のような異なる時間における比較測定を行うような場合においては、そのような考慮が是非必要である。

コーティング済みのフィルタをカットして使用するとその側面部分より湿気が入り劣化してしまうので、最初から所定の大きさにて製作し、コーティングすることが必要である。

(2) ソラリゼーション

強い紫外放射を照射することによりフィルタが黄変したり、白濁することがある、これはソラリゼーションと呼ばれており、特にキセノンランプのような強力な光源の近くに色ガラスフィルタを配置するとこのような現象が発生する。光ビームが広がっている場所、または既に単色光となり強度の低くなっている、分光器の出射スリット側で使用することが望ましい。ソラリゼーションを防止用コーティング処理を行うこともできる。

(3) 蛍光

色ガラスフィルタに紫外線を照射すると、蛍光を発生し測定に支障を来すことがある。市販製品カタログにおいては、表に示されるようなものが蛍光が多いと表示されている。

各種色ガラスフィルタの蛍光発光特性を測定した結果を図 6 に示す。図 6 においては、信号強度は、検出器(光電子増倍管)の信号出力である。そのため、光の絶対強度となっていない。シリコンフォトダイオード等他のタイプの検出器を使用する場合には注意が必要である。(表 2 参照) ([付2-17] 頁(注)参照)

蛍光発光は被照射部分において発生し、発散光源となるので、光を集光した部分で使用するとその影響が大きい。光束が広がっている場所で使用するべきである。色ガラスフィルタ L39(UV39) は鉛ガラスでつくられており、蛍光発光量が他のフィルタに比較して少ない。このフィルタを最初に挿入して紫外線を低減することにより蛍光を減少することができる。

(4) 熱による劣化

色ガラスフィルタは光を吸収することにより不要な光を阻止するので、光源の近く、または光が集光されている入射スリット近辺等に配置すると、吸収した光の発熱により破壊することがある。本測定においては、フィルタは出射スリット側に配置することが望ましい。できるだけ集光されている部分に置かず、広く均等に光を当てるようにすればある程度破壊を防ぐことができる。

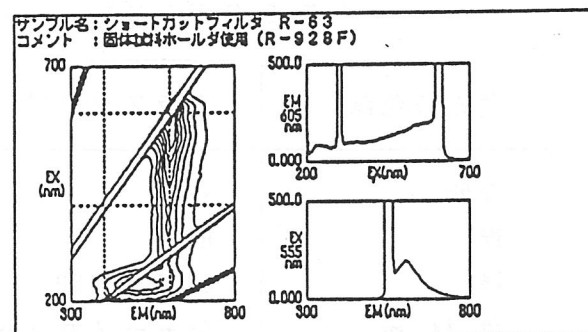
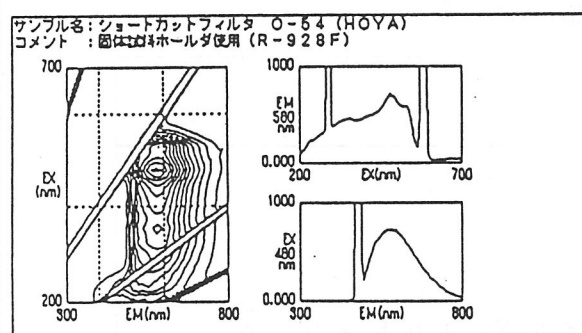
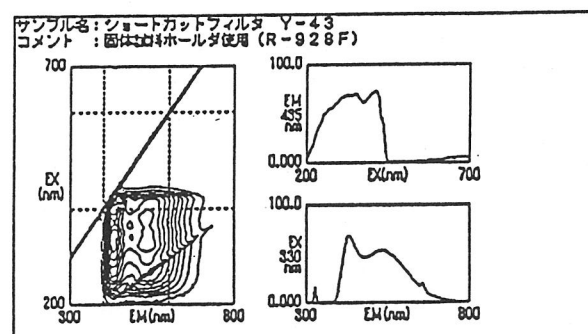
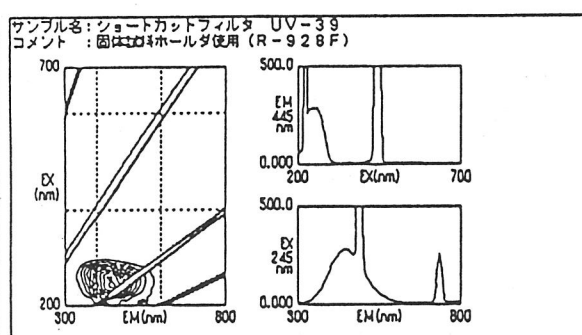
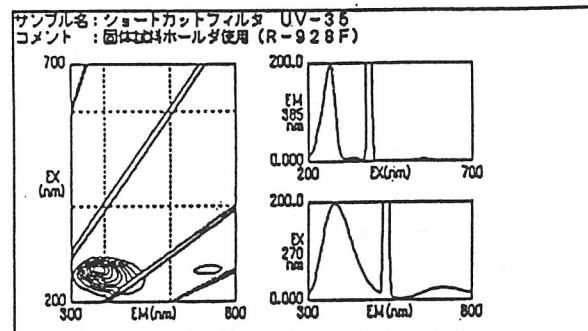
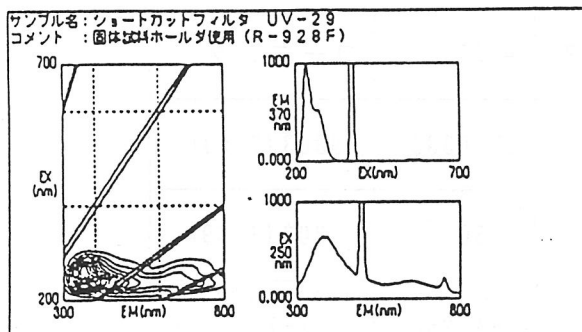
色ガラスフィルタは、このように熱により破壊されること以外に、分光透過率特性が変化する特性を持っている。シャープカットフィルタでは、遮断波長は、温度上昇と共に長波長側へ移動する。その程度は $0.12\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ であるがこの特性は長波長のシャープカットフィルタ程その傾向が激しい。強い発熱では遮断波長が恒久的に変化してしまうこともある。

表 1 大気中で劣化しやすい色ガラスフィルタ

	HOYAガラス	東芝	コーニング
紫外域	U-330	UV-D33S	9863 (7-54)
シアン青	B410	C-50S	4309 (4-69)
熱線カットフィルタ	HA-30	IRA-25S	1-75

表 2 色ガラスフィルタの蛍光発光⁸⁾

蛍光の色調	ガラスタイプ
青紫	V-10
青	HY-1
緑	B460, B-480
黄 橙 赤	シャープカットフィルタ Y O R シリーズ



項目	UV-29	UV-35	UV-39	Y-43	O-54	R-63
ピーク波長 (EX/EM nm)	235/385	270/385	245/440	415/435	480/580	565/610
ピーク強度 (相対強度)	14	193	4	72	10	3

図 6 色ガラスフィルタの蛍光発光特性

3. 2 干渉フィルタ

干渉フィルタは多くの薄膜の間の光の干渉効果を利用し、特定波長を透過、または阻止するものである。バンドパスフィルタとしてよく使用される。その他に色ガラスフィルタでは達成できない近赤外、赤外波長領域でのシャープカットフィルタがこの干渉フィルタにより製作されている。

干渉フィルタは、ガラス基板、色ガラスフィルタ等と組み合わせられて構成されており、外見上からはその反射色により裏表が異なっているように見えるが、その分光透過率特性は、どちらの面から光を入射しても違いはない。しかし、フィルタにおける吸収、劣化、干渉フィルタ表面の反射等が引き起こす効果を考えて使用する向きを決めることが必要である。

(1) 反射光

干渉フィルタを使用する場合、阻止された反射光の一部は、もとの光路へ戻っていくのでそれが迷光とならないよう考慮して光学設計をする必要がある。これは特に干渉フィルタ自身の分光透過率を測定する際に重要である。

(2) 温度と透過波長の関係

温度上昇と共に中心波長は短波長側へシフトする。そのシフト量は数値的にはっきりしていない。製造方法により、温度による波長シフト量を少なくすることが可能で、発注時メーカーとよく打ち合わせることが必要である。

(3) 経年変化

膜がガラス基板に付着されている構造になっているので、長い時間の経過、温度変化とともに特性が変化したり、膜が剥離することがある。膜周辺から湿気が入ることによっても膜がはがれることがあるので通常はフィルタ周辺はシールされている。そのため、できあがった製品を小さくカットして使用することはできない。最初から所定の大きさでつくる必要がある。

(4) 入射角度と透過波長の関係

一般的に透過最大波長は入射角 θ が大きくなると短波長に移動する。その他に、半値幅がひろくなり、透過率が低減する。図 7 に各入射角度に対する干渉フィルタの分光透過率特性を示す。この特性は、干渉フィルタの中心波長、半値幅等により異なる。これより求めた透過最大波長と入射角度の関係を図 8 に示す。殆どの干渉フィルタにおいては入射角が 10° 以内では透過最大波長の短波長への移動は最大 3nm 程度である。フィルタ本来の特性を出すためには、できるだけ平行光を入射させなければならないが、入射角を 10° 以内にすれば波長シフトは3nm以内にすることができる。

3. 3 その他のフィルタ

アセテートベース等のプラスチック系統のフィルタもあって、簡便のため一緒によく使われているが(フジフィルタ、コダック ラッテンフィルタ等)、耐久性その他に問題があるので、一時的な使用はよいが、恒久的使用は避けた方がよい。

アセテートベースフィルタは一般的に波長700nm以上では透過率が急激に上昇してフィルタとしての機能を失うことが多いので赤外では使用できない。

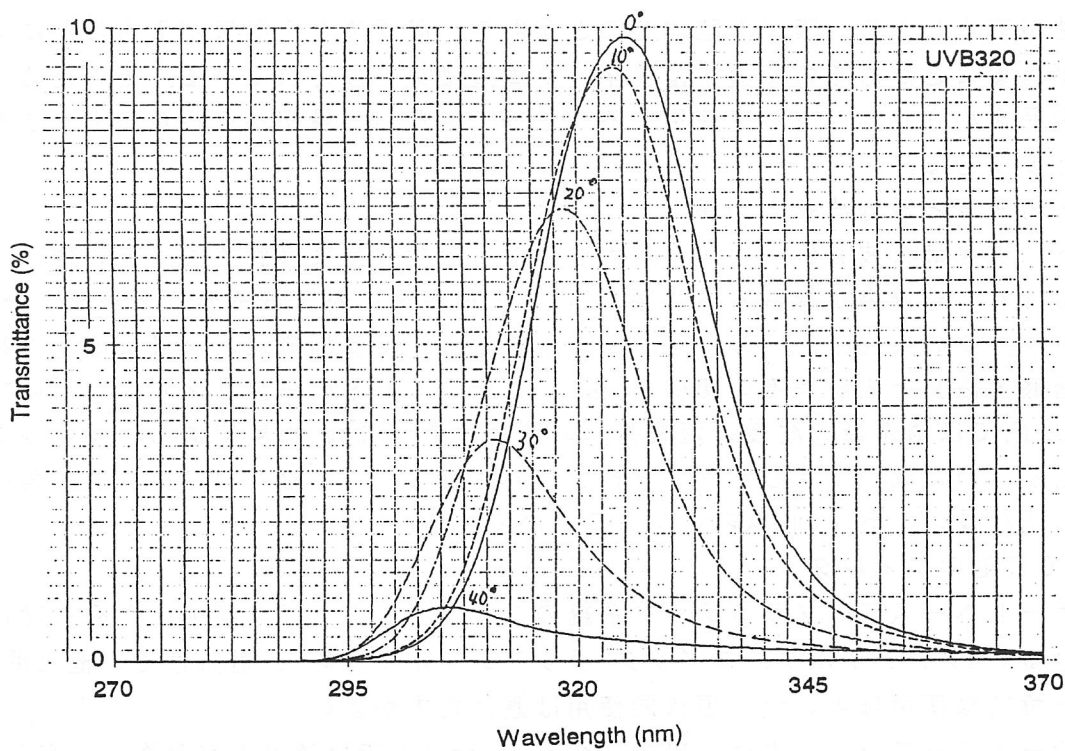
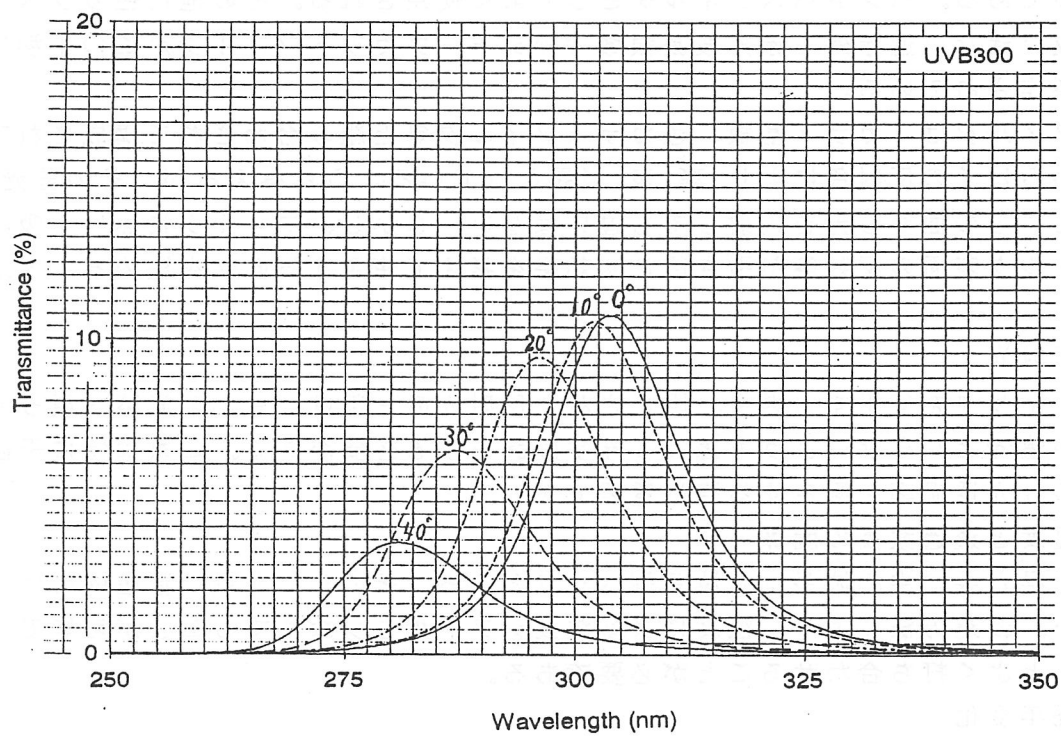


図 7-1 各入射角度に対する干渉フィルタの透過率特性

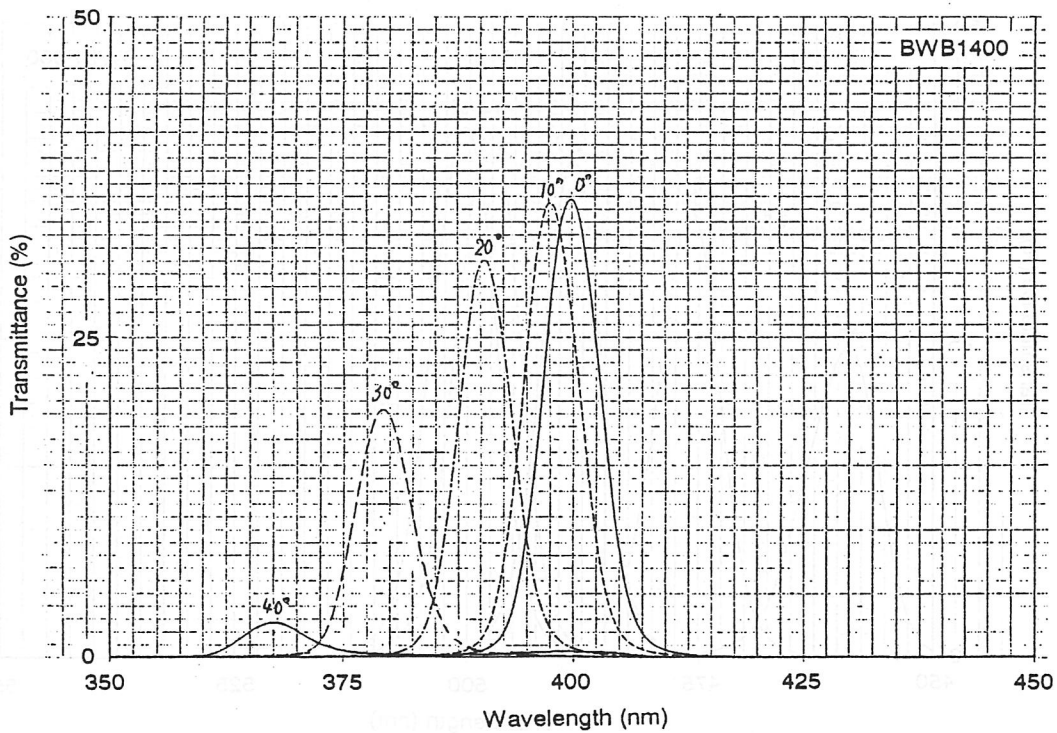
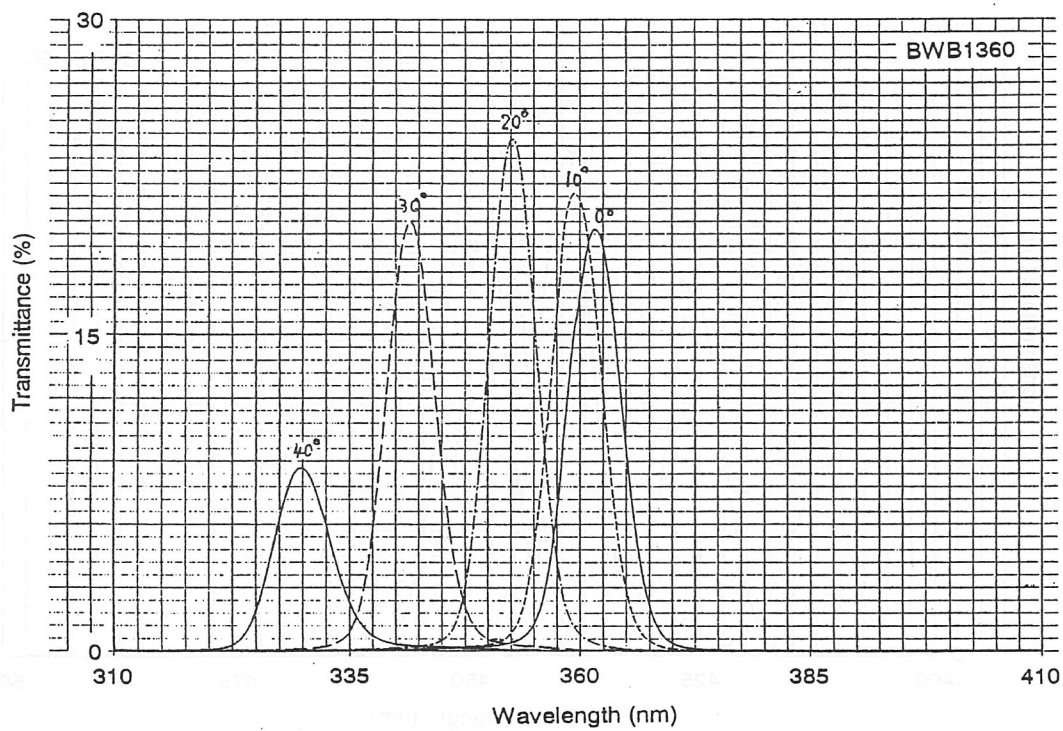


図 7-2 各入射角度に対する干渉フィルタの透過率特性

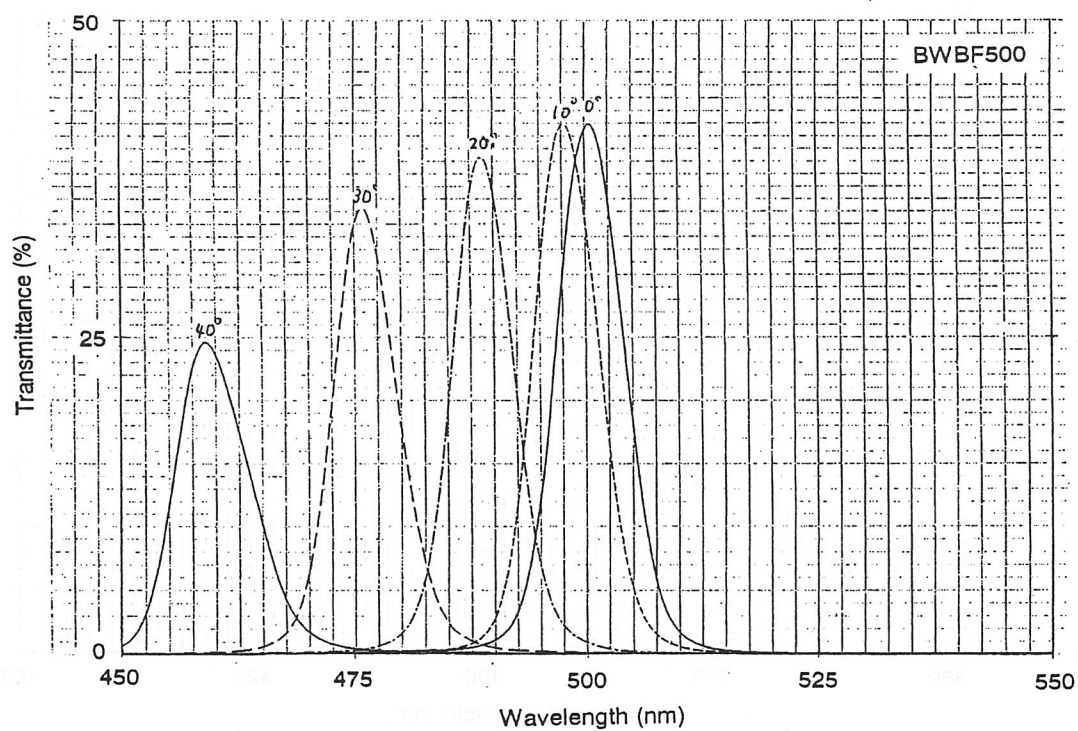
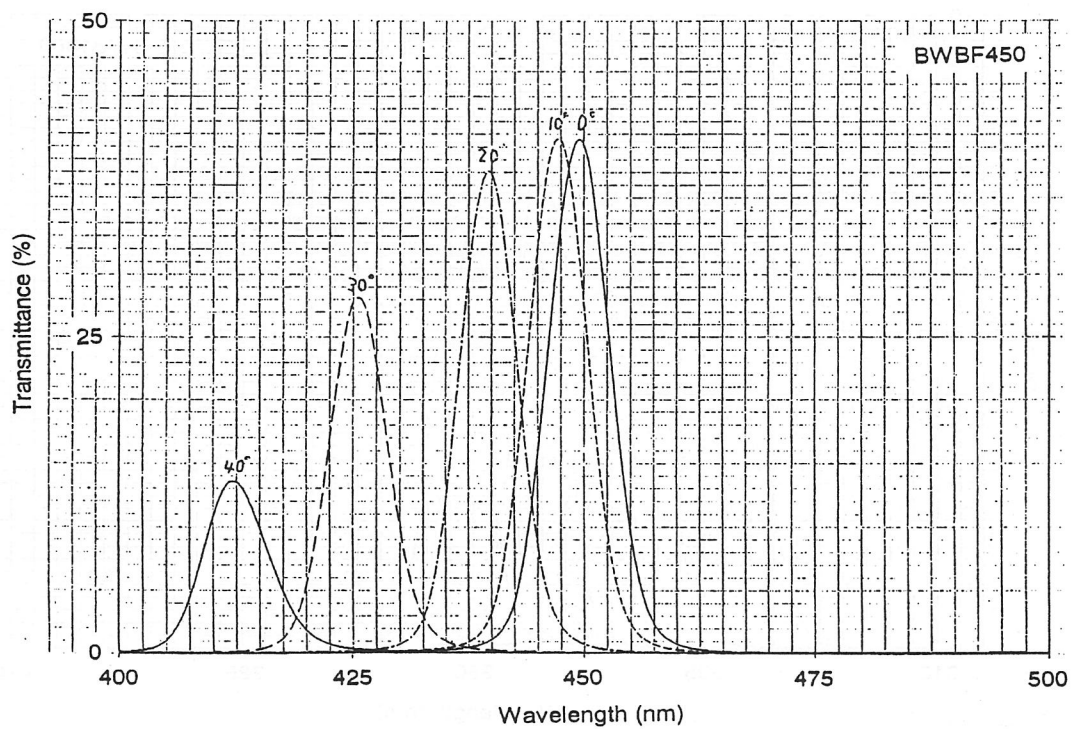


図 7-3 各入射角度に対する干渉フィルタの透過率特性

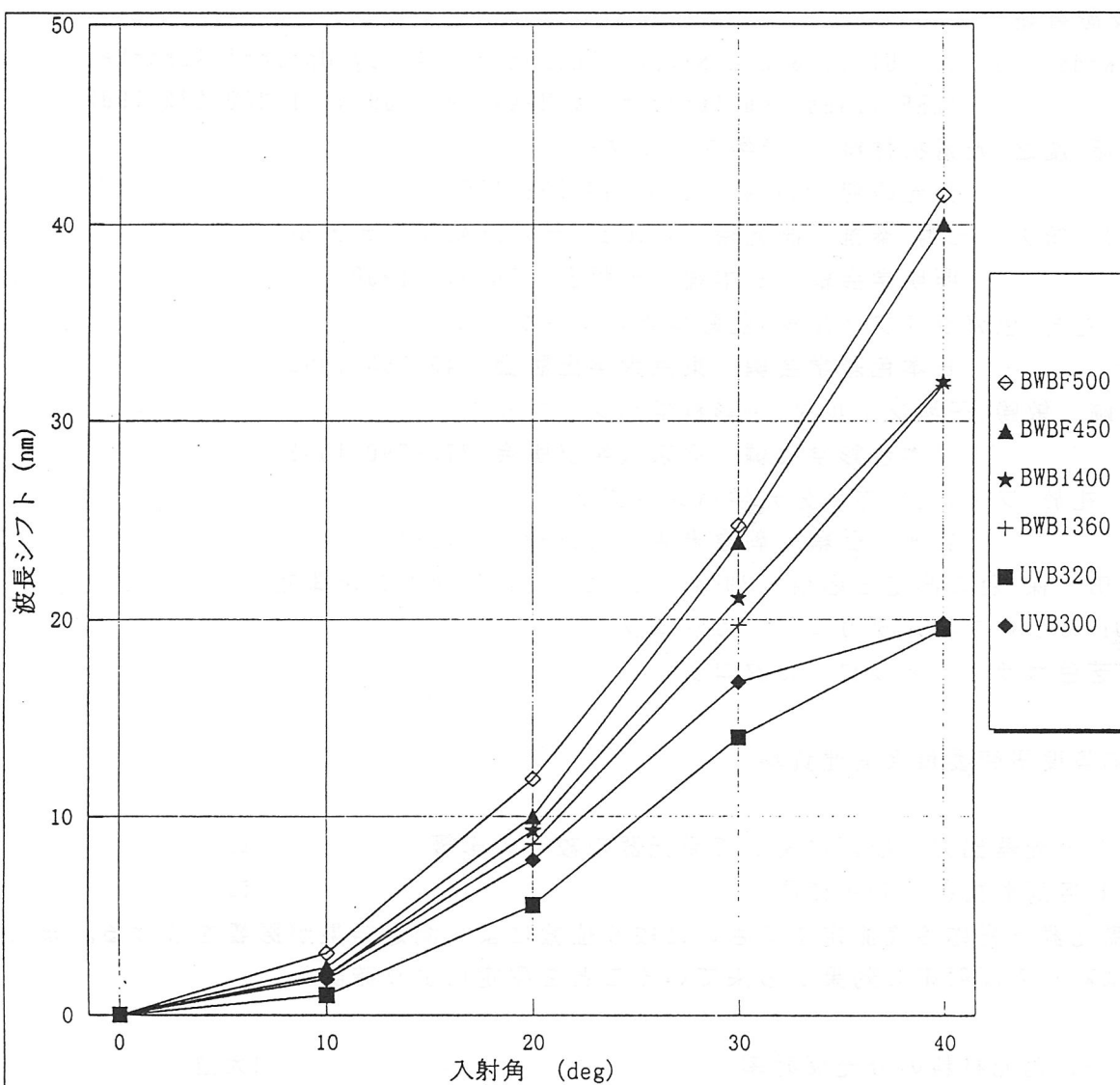


図 8 干渉フィルタの入射光角度特性

参考文献書籍

1. S.Kodama et.al. Ultra Black Nickel-Phosphorus Alloy Optical Absorber
IEEE Trans. on Instrum. & Meas. vol.39 no.1 230-232 1990
2. 浅原 慶之:光選択材料 -光学フィルター-
分光研究 vol.45 no.5 249-258 1996
3. 中川 靖夫 三嶋 泰雄:測光用フィルタ 光の計測マニュアル
照明学会編 日本理工出版会 76-91 1990
4. 森 礼於:色ガラスフィルタ 色彩科学ハンドブック
日本色彩学会編 東京大学出版会 745-758 1992
5. 岩崎 敏勝:干渉フィルタ 色彩科学ハンドブック
日本色彩学会編 東京大学出版会 775-790 1992
6. 森 礼於:フィルタ 応用分光学ハンドブック
吉永 弘編 朝倉書店 259-283 1984
7. 福田 保:色の測定と応用 39-41 1952.7.31 日刊工業新聞社
8. HOYAカラーフィルタガラス カタログ
9. 東芝色ガラスフィルタ カタログ

分光応答度研究委員会関連資料

95-5-6 分光器出力の校正に関して受光器の絞りの影響 (口)

96-2-4 無反射塗装の効果確認 (口)

受光器分光応答度測定するさいに絞り位置により測定結果が影響をうける。またそれは絞りの反射率の効果から来ていることを測定により確認した。

96-1-5-1 遮光材料の分光反射率 (大倉)

96-1-5-2 各種の黒色材料の分光反射率 (中川)

各種塗料、遮光材料の分光反射率を測定した

96-1-6 ショートカットフィルタの蛍光特性 (越)

各種ガラスカットフィルタについてその蛍光発光特性をまとめた

96-2-3 干渉フィルタの斜め入射光特性の実測結果 (佐々木)

96-3-3 干渉フィルタの入射角と最大透過波長シフト量の関係 (中川)

干渉フィルタに斜め光を斜め入射させた場合
の特性を測定

(注) 図 6 ガラスフィルタの蛍光発光特性について

図 6 は、各種ガラスフィルタの蛍光発光特性を示すものである。等高線を用いて表示されたグラフは、横軸が励起光波長、縦軸が蛍光波長を示してする。等高線の高さが、横軸の波長にて励起された試料の縦軸波長における蛍光強度を示している。

この測定においては、本文にあるとおり、検知器として光電子増倍管を使用し、その出力信号をそのまま任意単位として表示しており、絶対強度とはなっていないので注意する必要がある。

グラフ中にいくつかの斜線が見られるがこれについて以下に説明する。

試料に光を照射すると試料表面より蛍光以外に、表面反射光が検出される。これは励起光スペクトルに試料表面反射率を乗じたものとなる。

本実験においては、励起光、また蛍光測定ともに回折格子分光器を使用し波長選択を行っているが、いずれの分光器においても高次光カットフィルタを使用していないので高次回折光の影響をうけている。そのため、励起光スペクトルとして波長 λ_0 を選択すると、 λ_0 の整数分の 1 の波長の光が含まれることとなる。

励起光波長成分	λ_0 、 $1/2\lambda_0$ 、 $1/3\lambda_0$ 、 $1/4\lambda_0$ 、 $\dots$ 、 $1/n\lambda_0$ 、 $\dots$ (n - 整数)
---------	--

このため、このような励起光により蛍光測定した場合の反射光に、上式に示されるように、 λ_0 とその整数分の 1 の波長の成分が輝線として観測される。

また、蛍光側分光器内部においても、高次回折光が発生される、これは下記のように、入射した光の波長の整数倍の波長の場所に観測される。

蛍光分光器内高次回折光
$2\lambda_0$ 、 $3\lambda_0$ 、 $\dots$ 、 $n\lambda_0$ 、 $\dots$ (n - 整数)

ガラスフィルタにおいては、蛍光よりも反射光の方がはるかに強く、 λ_0 の輝線スペクトルが蛍光スペクトルと共に観測され、そしてこの λ_0 の輝線に対する高次回折光が蛍光と同時に観測される。

故に 図6 各グラフにおいて励起光 λ_0 における蛍光スペクトル中には下記に示される輝線スペクトルが観測されることとなる。

輝線が観測される波長
$1/3\lambda_0$ 、 $1/2\lambda_0$ 、 λ_0 、 $2\lambda_0$ 、 $3\lambda_0$ 、 $\dots$

これらはすべて分光器の高次回折光の影響からくるものであり実際の蛍光スペクトルではないので解釈には注意する必要がある。

V. 参 考 受光器構成要素の個別測定による分光応答度評価

1. はじめに

受光器の分光応答度を求める場合、受光器として完成した状態、すなわち、拡散板、フィルタ、光電素子などが組み合わせられてケースに納まった状態で分光応答度を直接に測定（以下、一括測定という）するのが基本である。しかしながら、現実には以下のような問題がある。

- (1) 分光応答度測定装置の出力の放射が弱く S/N が確保できない場合がある。（特に紫外放射領域）
- (2) 一般に使われている分光装置としては分光光度計（主に分光透過率を測定する装置）が数社から市販され、広く普及しているが、分光応答度の測定装置は特殊であり、一般的に特注製品である。従って自所の設備ではフィルタの分光透過率しか測定できない場合も多い。このような場合には、光学部品類は分光光度計で分光透過率の測定を行い、光電素子単体の分光応答度のデータは光電素子メーカーから入手して、各分光特性を掛け合わせて受光器全体としての分光応答度を求める方法（以下、個別測定という）を採らざるを得ない。

当委員会では、このような事情に対応するため、各委員に協力を求め、各種受光器について一括測定と個別測定の一致度の調査を行い、個別測定の問題点を明確化した。

2. 測定方法の違いによるデータの相違の原因

個別測定と一括測定による測定結果が相違する原因を大別すると以下のようなになる。

2. 1 大きな原因と考えられるもの

(1) 干渉フィルタの斜入射光特性

干渉フィルタは光が垂直入射した場合の中心波長を $\lambda(0)$ とした場合、 θ だけ傾いた光に対しては、その中心波長は、短波長にずれ、以下の式で近似される。

$$\lambda(\theta) = \lambda(0) \cdot \alpha(1 - \cos \theta)$$

従って、干渉フィルタの前に拡散板があるタイプの受光器では、拡散板によって斜め入射成分が増加するため、干渉フィルタ単体の中心波長と、受光器のピーク感度波長が合致しない恐れがある。

(2) 色ガラスフィルタの蛍光発光

分光光度計には、積分球付きタイプ（拡散透過率測定用）と積分球無しタイプ（正透過率測定用）の2種類がある。フィルタが蛍光発光するような場合、積分球無しタイプでは、蛍光発光を検出しない場合が多いが、積分球付きタイプでは照射用の光源によってフィルタが蛍光を発し、そのデータが分光透過率として混じって評価

される。実際の受光器では、各種フィルタの配置順序、光電素子との距離などの条件により、蛍光が発生したり、しなかったりするもので、その影響は大きく異なる。

2. 2 小さな原因と考えられるもの

(1) 測定ビーム径の違い

フィルタの透過率が場所によってむらがある場合、分光光度計と分光応答度測定装置の測定ビーム径の違いによる差が生じる。

(2) 波長目盛りの違い

分光光度計と分光応答度測定装置の波長精度が、それぞれ $\pm 0.3 \text{ nm}$ であれば、両者間で最大 0.6 nm の目盛りずれが生じる可能性がある。

(3) 出射照度むらの違い

一般に、モノクロメータから出射した単色光には照度むらがあるが、分光光度計と分光応答度測定装置で照度むらの状態が異なる場合、測定結果に影響する。

(4) 分光光度計内蔵の光電素子と受光器の直線性の違い

分光応答度測定には、不可分的に入射光に対する光電素子の直線性誤差が含まれる。受光器に使用される光電素子は一般的にSPDであり、分光光度計に内蔵されている光電素子は一般的に光電子増倍管である。

(5) フィルタ間、フィルタと光電素子間の相互反射

絶対分光応答度に変化する要因にはなるが、相対分光応答度には影響は少ないと推定される。

3. 測定事例

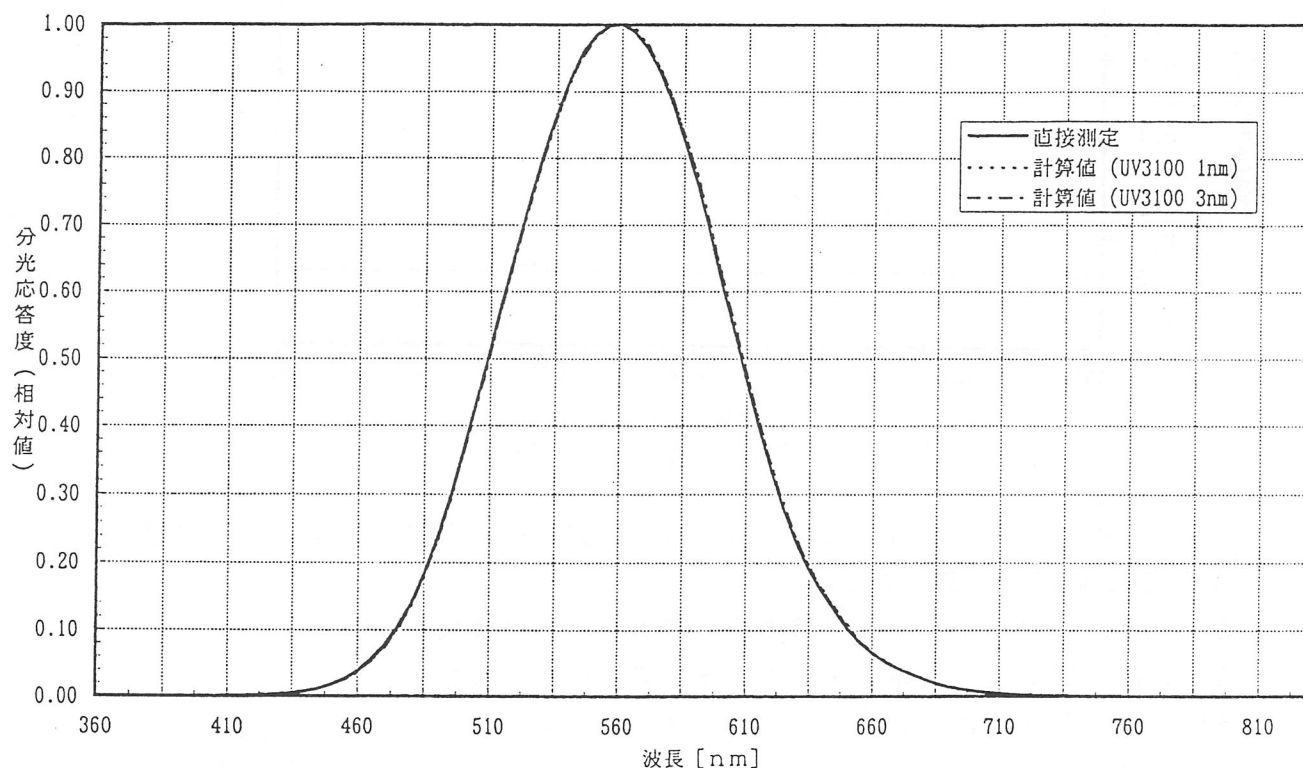
個別測定と一括測定におけるデータの一致度は、受光器の種類ごとに大幅に異なることが予測された為、各種受光器に対して各委員で測定し、約15件の事例が収集された。事例を大きく分類すると以下ようになる。

受光器の種類	拡散板の種類	フィルタの種類
V (λ) UV 実験用セット 三刺激値のZ	アクリルオパール 合成石英砂ずり テフロン系樹脂	色ガラスフィルタ アセテートベースフィルタ 干渉フィルタ

また、本測定に関連して干渉フィルタの斜入射光特性に関する測定事例が報告された。このデータについては、付属書2に掲載した。ここでは、代表的なデータを3例掲載する。

図1は、 $V(\lambda)$ 受光器の測定事例である。受光器の構成としては、色ガラスフィルタと光電素子の組み合わせであり、拡散板は使用していない。
 フィルタ単体の分光透過率の測定については、島津製作所製UV3100を用い、波長幅1nmと3nmの2通りについて行っている。図中の「直接測定」は一括測定、「計算値」は個別測定の意味である。

図1 $V(\lambda)$ 受光器の測定事例



J I S C 1 6 0 9 -1993「照度計」による f_s 値を計算すると以下の値となる。

個別測定（波長幅 1 nm）： 5.14 %

“ （波長幅 3 nm）： 5.10 %

一括測定（波長幅 5 nm）： 5.14 %

前記、J I S による一般形 A A 級の規格値が「 f_s : 8 % 以下」なので、図1に示した受光器が J I S 一般形 A A 級を目指した受光器とするならば、測定方法による結果の違いは無視できる。

図2は、分光応答度ではなく、光学部品の分光透過率での事例である。拡散板（テフロン系樹脂）と干渉フィルタについて個別に分光透過率の測定を行って掛け合わせた場合と、両者を重ねて分光透過率を測定した場合とを比較している。拡散光を干渉フィルタに入射させると前述したように中心波長が短波長側にシフトすることがわかる。

図2 拡散板及び干渉フィルタの分光透過率測定

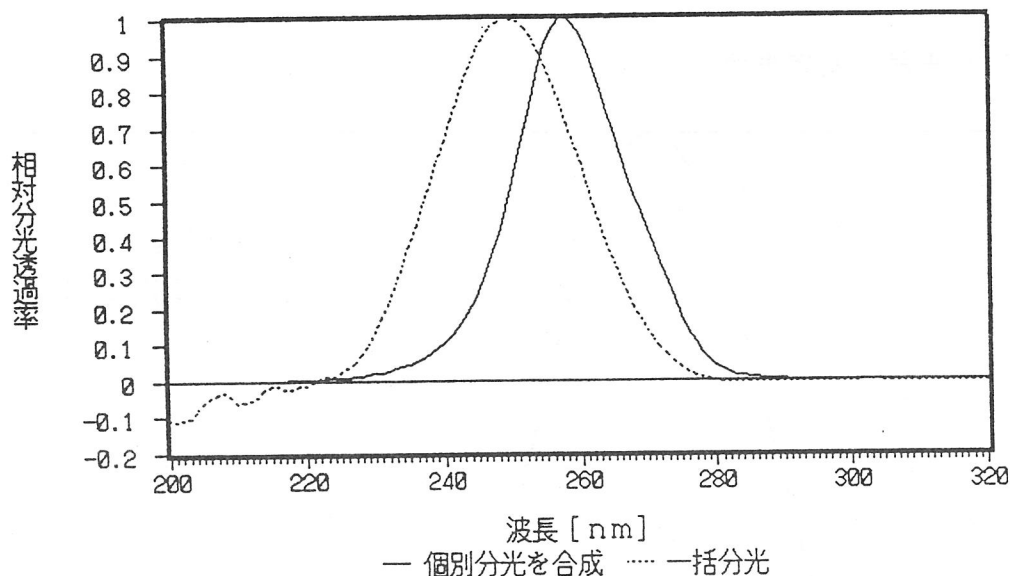


図3は、干渉フィルタを用いた受光器における拡散板（合成石英砂ずり、片面メッシュ280）の影響を測定した例である。

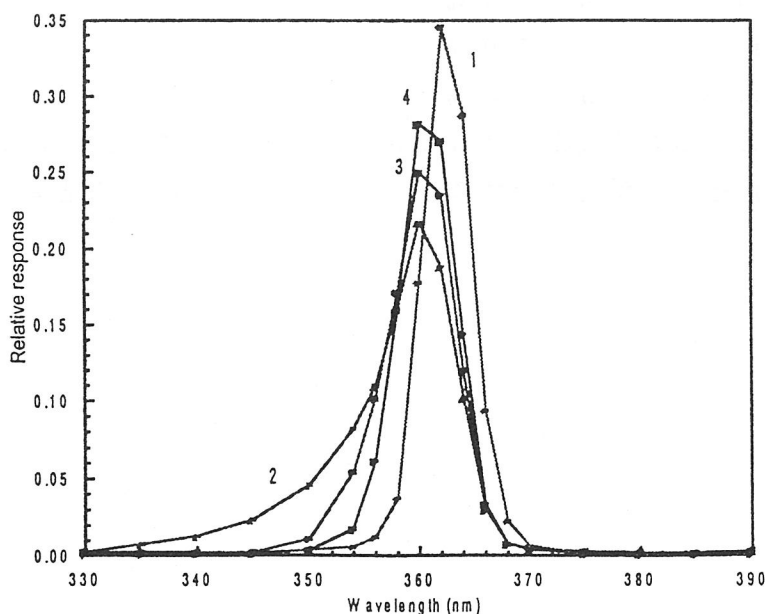
条件1は、干渉フィルタ、光電素子の密着状態（拡散板無し）

条件2は、拡散板、干渉フィルタ、光電素子の密着状態

条件3は、条件2に対し、干渉フィルタと光電素子を15 mm離した場合

条件4は、条件2に対し、干渉フィルタと光電素子を30 mm離した場合

図3 拡散板及び干渉フィルタを用いた受光器における拡散板の影響



本例からも、拡散板と干渉フィルタを組み合わせた受光器においては、拡散板の影響によって、干渉フィルタ本来の中心波長が短波長側にシフトすることが確認できる。また、そのシフトの量は、拡散板・干渉フィルタ・光電素子の位置関係によって様々に変化することがわかる。

4. 結 論

- (1) 色ガラスフィルタを用いた受光器では、個別測定、一括測定両者の結果は、よく一致し、相互差は用途にもよるが実用的にはほぼ問題無いレベルと判断される。
- (2) 拡散板と干渉フィルタを組み合わせた受光器では、個別測定と一括測定の差異が大きく、このような受光器において、単純に個別測定を行って組み合わせの応答を求めるのは無理である。
- (3) 拡散板と干渉フィルタを、受光器に組み込まれる状態に近づけて両者を一括で分光透過率測定すれば、拡散板、干渉フィルタをそれぞれ単体で測定するよりは、本来の分光応答度に近づくものと推定される。ただし、この方法は、分光光度計のS/Nの限界に近い測定となるので、データの数も多くし、スムージングするなどの工夫も必要である。

5. おわりに

個別測定と一括測定が相違する原因と、測定事例及び測定上の注意点を示した。紫外領域の分光応答度測定を行う場合、分光応答度測定装置の出力放射が弱く、測定に窮することがある。このような場合、個別測定から分光応答度を予測せざるを得ないが、ここで述べた事柄を十分理解した上で行うことが必要である。

最後に、分光応答度測定装置を新規に製作する場合には、波長帯によって、光源が選択できるように、ハロゲン電球／キセノンランプ切り替え式としておくことを推奨したい。

