

紫外放射の標準と校正技術

紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会報告書 第2分冊

平成6年3月

社団法人 照明学会

目 次

1. 総 論

1. 1 概 要	1
1. 2 委員会 の 構成	1
1. 3 委員会 活 動 の 概 要	2
1. 3. 1 産 業 界 に お け る 紫 外 放 射 の 応 用 と そ の 測 定 の 調 査	2
1. 3. 2 紫 外 常 用 放 射 標 準 の 設 定	3
1. 3. 3 標 準 の 供 給 と 維 持	4
1. 4 報 告 書	4
1. 4. 1 報 告 書 第 1 分 冊 の 内 容	4
1. 4. 2 報 告 書 第 2 分 冊 の 内 容	5
1. 5 お わ り に	6

2. 254 nm 常 用 標 準 の 設 定

2. 1 GL-15、GL-10の254 nm常 用 標 準 放 射 源 と し て の 運 用	7
2. 1. 1 値 付 け す る GL-15、GL-10の 選 定	7
2. 1. 2 常 用 標 準 放 射 源 と し て の 点 灯 条 件	7
2. 2 受 光 器 標 準 に よ る 254 nm常 用 標 準 放 射 源 の 値 付 け	10
2. 2. 1 254 nm常 用 標 準 受 光 器 を 仲 介 し た 値 付 け 方 法	11
2. 2. 2 フィルタに よ る 254 nm輝 線 分 離 法 に よ る 値 付 け 方 法	15
2. 2. 3 標 準 電 球 と フィルタ に よ る 受 光 器 の 絶 対 応 答 度 の 値 付 け	17
2. 2. 4 受 光 器 標 準 か ら 254 nm常 用 標 準 放 射 源 へ の 値 付 け の 確 か さ	20

3. 連続スペクトル常用標準

3. 1	常用標準用Xeランプの選定について	24
3. 1. 1	測定に用いたランプの概要	24
3. 1. 2	Xeランプ(150W)の配光特性	24
3. 1. 3	選定にあたっての測定方法	24
3. 1. 4	ランプハウス	27
3. 2	Xeランプの動程特性	27
3. 3	Xeランプ分光放射照度の値付け	32
3. 3. 1	分光放射照度標準電球について	32
3. 3. 2	測定条件ならびに測定方法	34
3. 3. 3	測定光学系および測定方法(電子技術総合研究所)	34
3. 3. 4	測定光学系および測定方法(埼玉大学)	34
3. 4	分光放射照度測定例	37
3. 5	ランプハウスと一体化したXeランプ	37

4. 受光器標準

4. 1	シリコンフォトダイオードによる受光器標準	42
4. 1. 1	分光応答度と受光面内の均一性(ユニフォームリティ)	42
4. 1. 2	直線性	42
4. 1. 3	経時変化特性	42
4. 1. 4	温度変化特性	42
4. 1. 5	取扱方法	45
4. 1. 6	その他の注意事項	45
4. 2	国内4機関における分光応答度の値づけの結果	45
4. 2. 1	参加機関, 試料	45
4. 2. 2	比較測定と評価の手順	47
4. 2. 3	測定方法	47
4. 2. 4	結果と評価	48
4. 3	分光応答度の絶対的な値	52
4. 4	受光器による放射標準の動向	52

5. 分光分布と分光応答度測定の手法

5.1	分光分布の測定	55
5.1.1	測定に必要な機材	55
5.1.2	入射光学系	55
5.1.3	標準と試料の配置	57
5.1.4	波長セッティング	57
5.1.5	測定のシーケンス	57
5.1.6	迷光の補正とダイナミックレンジ	58
5.2	分光応答度の測定	60
5.2.1	測定に必要な機材	60
5.2.2	入射および出射光学系とその調整	60
5.2.3	波長セッティング	62
5.2.4	標準と試料のセッティングと測定のシーケンス	62
5.2.5	迷光の補正とダイナミックレンジ	62
5.3	測定値の処理	62

6. その他

6.1	365 nm放射の値付けについて	63
6.1.1	放射源の選定	63
6.1.2	365 nm放射照度の値付け	63
6.1.3	クレフト水銀ランプ	64
6.2	185 nm放射の値付け標準について	64
6.2.1	185 nm測定の概念	64
6.2.2	放射源の選定	64
6.2.3	185 nm放射照度の値付け	67
6.3	重水素ランプ	67
6.3.1	重水素ランプの概要	67
6.3.2	重水素ランプの分光分布	69
6.3.3	重水素ランプの点灯特性	69

1. 総 論

1. 1 概 要

紫外放射の応用は産業界の広い分野にわたっていて、近年とくに、その無公害性から、殺菌、浄化方面での需要が増大している。しかし、このような応用で常に問題にされる必要照射量を定める基礎量である、紫外放射照度（対象物の面に与えられる紫外放射の密度）の測定方法が完成されておらず、測定器の仕様などについても、統一された基準がないため、種々の混乱が生じている。

このよな事情から、照明学会に対して、産業界から紫外放射照度の測定を含む紫外放射測定の研究・調査を行うよう要望があり、平成3年度から紫外放射の放射照度測定方法研究調査委員会が発足し、平成5年には照明学会の特別予算を給付されて表記の特別研究委員会となり、活発な研究活動を行った。委員数は後述のように19名で、この間の委員会開催数は15回であり、多数の実験、測定・調査を行い、報告書を作成した。ここで特筆したいのは委員会の出席率であって、全15回の平均出席率は88%であり、参加者が極めてアクティブであったことを示している。

委員会の活動は下記の2項に大別されるので、報告書もそれに沿って2分冊としてある。

- (1) 産業界における紫外放射応用の実態（種別、実施例など）と、それに必要とされる測定量（波長的・空間的要素）、測定環境、及びこれに対応する産業用測定器（いわゆる紫外照度計）の実態調査。使用者例の要求を分析した結果にもとづく測定器の仕様と、測定器製作者の見解にもとづく仕様の対比。（分冊1，全87ページ）
- (2) 産業測定の基準を確立するための放射の標準と、産業の現場で使用する常用標準として使用するものの入手と選別の方法、校正源として使用するための目盛付けの方法、経時変化、分光放射測定の技術と具体的な手段など。（分冊2，全71ページ）

これらの具体的な内容の概要を本編1.4に示す。

1. 2 委員会 の 構 成

委員会の構成は以下のとおりである。なお委員は2つのワーキンググループ（WG）に分かれ、それぞれ報告書1，2の作成を担当した。WGの所属は(1)，(2)のようにして示してある。

委員長	中川 靖夫	(埼玉大学)
幹事・WG1主査	石野 正敏	(東芝ライテック(株))
幹事・WG2主査	大谷 文雄	(埼玉大学)
委員・(1)	相原 清	(株)オーク製作所)
委員・(1)	浦上 逸男	(千代田工販(株))
委員・WG2幹事	大久保 和明	(松下電器産業(株))
委員・(1)	後藤 学	(ウシオ電機(株))
委員・(2)	斎藤 一郎	(電子技術総合研究所)

委員・(1)(2)	佐々木 政子	(東 海 大 学)
委員・WG2 幹事	須山 恵司	(浜 松 ホ ト ニ ク ス 株)
委員・(2)	高沢 恒士	(東 京 都 立 工 業 技 術 セ ン タ ー)
委員・(1)	谷水 伸吉	(株 日 立 製 作 所)
委員・WG1 幹事	戸沢 均	(株 ト プ コ ン)
委員・WG1 幹事	古海 浩	(ニ ッ ポ 電 気 株)
委員・(1)	干場 芳洋	(岩 崎 電 気 株)
委員・(2)	本間 誠一	(日 本 電 気 計 器 検 定 所)
委員・(1)	馬込 一男	(三 菱 電 機 オ ス ラ ム 株)
委員・(1)(2)	峰松 陽一	(芝 浦 工 業 大 学)
委員・(1)	三宅 行美	(英 弘 精 機 株)

委員外の参加者

古橋 正吉(東京医科歯科大学), 大沢 理(ウシオ電機株), 三好 和彦(岩崎電気株), 吉川 和彦(東芝ライテック株), 安田 誠(株日立製作所), 竹下 秀(東海大学)

1. 3 委員会活動の概要

前述のように本委員会では大別して2種類の事項について調査・研究を行った。その1つは産業界における紫外放射の応用の実態と、それに関して要求される測定法の実態の調査である。第2の事項は、実用測定を行う際の測定器の校正、放射源の測定を正確に行うための、常用標準器の設定とその値付けに関する基準の作成である。これらについて行った活動は以下のとおりである。

1. 3. 1 産業界における紫外放射の応用とその測定の調査

産業界において紫外放射の応用がどのように行われていて、その際にどのような測定方法、測定量が必要であるのか。そして、現状の測定装置や測定の規約で、それがどの程度満足されているのか。さらに理想的な測定器についての要求仕様はどのようなものか。などを中心とした調査は、委員及び関連業界等の有識者の発表と討論によるヒアリングを1回約1時間で、計12回行って実施した。また、関連機関である日本電気計器検定所の見学会を行い、紫外放射の測定器に関するアンケート調査を行った。

ヒアリングの分野は医用関係1件、半導体産業関係1件、印刷・水浄化・殺菌関連5件、自然光関係1件、光源関係1件、測定法・測定器関係3件であって、この結果から産業界での紫外放射の応用は、水処理、表面浄化・殺菌の分野のシェアが相当大きいと考えられた。使用方法の特色は、長い放射源で至近距離(数cm以下)の照射を行うことであり、放射源直近の大入射角の放射照度が測定対象になることが確認された。

また、産業界の現場で用いる、紫外放射照度計については、機器の個体差、校正方法の不統一に起因する測定上の問題点(放射源の種類が異なると指示の誤差が大きく変動すること)、入射角度特性が不十分である、などの多くの指摘があった。それらと測定器メーカー側との意見交換が活発に行われて、現場側からの要求仕様ととして表1.1に示すよう

な数値がまとめられ、受光器の厚みを除き、ほぼ要求を満足できるとのメーカ側の見解がしめされた。但し、最も問題となっている、校正方法の統一については更に検討が必要であるので、次に述べる標準の維持の問題と共に、学会から産業界（日本電球工業会など）へ問題提起を行って調整を行うよう検討することとした。

表 1. 1 U V 用 検 出 器 受 光 部 (ヘ ッ ド) の 要 求 仕 様
(最も厳しい要求)

	要 求 仕 様	測 定 対 象 の 装 置 の 用 途
受 光 器 ヘ ッ ド の 大 き さ (平面寸法, 円形・矩形等)	受光面 $\phi 20 \text{ mm}$	フ リ ッ ク-用 マ イ ク ロ 波 放 電 光源装置のUV測定及び被照射面強度の測定
受 光 器 ヘ ッ ド の 厚 み (底面から受光面までの距離)	1.5 mm	フ リ ッ ク-用 マ イ ク ロ 波 放 電 光源装置のUV測定及び被照射面強度の測定
入 射 角 (1) 絶対的に入射をとり込みたい角度範囲	$0 \sim 80^\circ$	水殺菌, 品包装材料の殺菌, 光酸化処理 光CVD, 食品容器の殺菌,
入 射 角 (2) $\text{COS}\theta$ 特性をほぼ満足したい角度範囲	80°	UV硬化樹脂の硬化 表面コート
使 用 温 度 の 上 限	$60 \text{ }^\circ\text{C}$	業 界 全 般
上 記 温 度 で の 測 定 時 間	連続使用可能	焼付装置露光管理 樹脂, 塗料, インキ等の硬化照度管理

1. 3. 2 紫外常用放射標準の設定

第2の事項は紫外域における放射の測定方法、とくに測定を行う際の基本となる標準器からの値を、産業の現場で使用できるように整えることである。紫外放射の公的な標準は日本電気計器検定所が供給しているハロゲン電球であるが、これは紫外域での放射照度が非常に弱くて、これによって実用的な測定を行うためにはかなり高度の技術と設備が必要であり、現場向きでない。1.3.1の実態調査から、産業界で要求の多い常用放射標準として、254 nmライン放射用のものがあげられたが、この種の常用標準となる殺菌ランプGL-15等の放射を、ハロゲン電球で直接目盛付けすることは一般には極めて困難である。そこで本委員会では254nm放射常用標準に関しては次のような方策を設定した。

- (1) 254nm ラインの放射照度、及び放射照度計の分光応答度を校正するための常用標準として、受光器 (S1337-1010BQ シリコンホトダイオード) を設定する。
- (2) 但し、現場で使用する254nm 常用標準は、従来の経緯から放射源の方が好都合であるので、受光器から放射源へ値付けする方法を規定して、放射源の (GL-10, 15など) の使用を推奨することとした。なおこれらの放射源の選定・枯化などの方法については文献1) によることとした。
- (3) また、受光器常用標準設定の前提となる分光応答度の値付けの確かさを検討するために、国内4機関 (国家機関2, 民間2) によって分光応答度の相互比較を行い、実用的に十分な一致を見ることができた (文献2)。

次に254nm 以外の常用分光放射標準については、連続スペクトルが便利と考えられたので、その候補として150W Xeランプを選定して、常用標準としての使用上の要件である、多数回点滅の、短時間点灯に対する安定性、再現性のテストをほぼ全委員の参加で実施した。この結果L 2273（浜松ホトニクス）が100時間、100点滅での紫外放射照度変化が約2%以内であることが認められ、常用標準となり得ることが分った。また、このランプの分光分布の値付けと供給については将来的に日本電気計器検定所が行う態勢とすることが確認された。

1. 3. 3 常用標準の供給と維持

常用標準については、技術的な問題の他に、その目盛が関係業界の中で、いかに維持されて国家標準につながるかと云うトレーサビリティの確立が、実際上の重要事項となる。現在、蛍光ランプ等については業界内のこの態勢が整って、十分な状態にあり、これがユーザーの信頼につながっている。紫外放射応用についても、更なる発展を行うために、このことが極めて重要な要因となる。

本委員会で検討して推奨した常用標準についても、受光器校正に関する目盛は波長250nm～1100nmまでの分光応答特性が電子技術総合研究所から供給可能であるし、ハロゲン電球による分光放射照度標準にもとづくXeランプ常用分光放射照度標準も前述のように日本電気計器検定所から供給できる見通しであるので、これらにもとづく、254nm 常用標準など、あるいは標準的な紫外放射照度計などの値が常に公的な標準に対してトレーサブルであるかどうかを産業界内で継続的に相互比較し、維持・管理する組織の整備が必要であり、これに関しては照明学会でなく、日本電球工業会などの業界団体での協議が必要である。幸いこれに関しては関係各位の御理解をいただけそうなので、近い将来の実現を目指して努力中であることを付記したい。

1. 4 報 告 書

以上のような経緯から本委員会の報告書は2分冊とし、その1『紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器・方法の現状』、その2を『紫外放射の測定と校正技術』として、以下に示す内容で編集した。

1. 4. 1 報告書第1分冊の内容

『紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器・方法の現状』

1. 総 論

2. 産業界における紫外放射の応用と測定器の実情調査

2. 1 環境浄化（気中、流水等）、医療設備等の分野
2. 2 半導体産業の分野
2. 3 印刷・製版産業の分野
2. 4 自然太陽光のUV-B放射の測定について
2. 5 環境評価試験器での紫外線放射測定の分野

3. 紫外放射測定器の現状と問題点の提起
3. 1 実用紫外放射照度計の性能調査
3. 2 紫外放射照度計に対する要求仕様
3. 3 要求仕様に対する紫外放射照度計メーカーの対応
3. 4 分光応答度の問題
3. 3 校正の考え方
4. 紫外放射測定での誤差要因とその対応
4. 1 紫外放射測定での留意すべき事項
4. 2 至近距離測定での誤差要因
4. 3 標準トレーサビリティ
5. まとめ

1. 4. 2 報告書第2分冊の内容

『紫外放射の測定と校正技術』

1. 総論
2. 254nm常用標準の設定
2. 1 GL-15、GL-10の254nm常用標準放射源としての運用
2. 2 受光器標準による254nm常用標準放射源の値付け
3. 連続スペクトル常用標準
3. 1 常用標準用Xeランプの選定について
3. 2 Xeランプの動程特性
3. 3 Xeランプ分光放射照度の値付け
3. 4 分光放射照度測定例
3. 5 ランプハウスと一体化したXeランプ
4. 受光器標準
4. 1 シリコンフォトダイオードによる受光器標準
4. 2 国内4機関における分光応答度の値づけの結果
4. 3 分光応答度の絶対的な値
4. 4 受光器による放射標準の動向
5. 分光分布と分光応答度測定の手法
5. 1 分光分布の測定
5. 2 分光応答度の測定
5. 3 測定値の処理

6. そ の 他

6. 1 365 nm放射の値付けについて

6. 2 185 nm放射の値付けについて

6. 3 重水素ランプ

1. 5. おわりに

本委員会の調査・研究が紫外放射応用の更なる発展に寄与できることを念願すると共に、本研究に対して絶大なる御協力をいただいた委員各位、実験用の機材を心よく提供いただいたウシオ電機㈱、浜松ホトニクス㈱に厚く御礼申し上げる次第である。

付 記 『標準』の意味について

『標準』又は『標準器』(Standard)とは本来、計量法などの規定にもとづいて国、公的機関あるいは国が認定した事業者が、値付けを行ったものに対する呼称である。具体的には例えば日本電気計器検定所で供給する分光放射照度標準電球を指す。しかし、この『標準』では放射照度が弱いこと、産業界の現場で使用するには寿命などの面から不利であることなどの理由から、商品などの実態に合わせて、この『標準』から使用者が値を移した、別種の校正用機材(光源、検出器)が常用されており、現場からはこのようなものの要望が多い。このような校正用の機材を一般に Working Standard と呼んでいるので、本報告書ではそれに相当するものを『常用標準』と呼ぶこととした。しかし、この『常用標準』と云う用語の一般的な適用については更に今後の論議を待ちたい。

(委員長 中川 靖夫)

参 考 文 献

(1) 東 堯：照学誌 57-4, 196 (1973)

(2) 中川ほか：照学誌 77-10, 658 (1993)

2. 254nm常用標準の設定

2.1 GL-15、GL-10の254nm常用標準放射源としての運用

2.1.1 値付けするGL-15、GL-10の選定

254nm常用標準放射源としてGL-15およびGL-10を選定するにあたり、その発光特性と電気特性の安定性、再現性について検討する必要がある。そのためには、まず値付けの候補となるランプを後述する点灯条件で十分にエージングする。

エージングは、ランプを定格条件で3時間点灯、15分休止で、延べ750時間点灯する。エージングの過程で250時間を経過後、100時間ごとに放射照度の測定を行い、波長254nmの放射照度の100時間当たりの変化が2%を越えるランプは、選定から除外する。このようにしてエージングを行ったランプを定格電力で点灯し、波長254nmの放射照度とランプ電流とを、点灯したまま5点繰り返し測定し、その変動を調べる。さらに、ランプを点灯台からはずし十分冷却したのち、同様の測定を行い、そのランプの再現性を求める。測定値の変動幅および、繰り返し再現性が±1%以内のものを選抜し常用標準放射源の候補とする。

エージングの点灯姿勢は水平とする。なお殺菌ランプは電極スポットの位置が移動すると安定性、再現性に悪影響を及ぼすので、口金ピンの接続方法はクロス結線（「2.1.2点灯条件」参照）として、エージング時、測光時を統一する必要がある。また、給電側の口金ピン側および放射照度の測定方向が明確になるよう口金のキャップに表示しておくことも重要である。

2.1.2 常用標準放射源としての点灯条件

(1) 点灯条件

常用標準放射源は、表2.1に示す試験用安定器と常に一組にして点灯する。ランプは、管軸を水平にし、その管壁の同じ側がいつも放射照度測定光軸に向くように点灯し、電極ピンの点灯回路への接続方法を明確にして測定する。電極ピンの点灯回路への接続方法は、光源のエージング時、および放射照度測定時ともに統一する。また、ランプ電力一定、あるいはランプ電流一定等の条件を指定しておく。図2.1に常用標準放射源としての殺菌ランプの点灯回路²⁾を示す。殺菌ランプのような低圧水銀ランプは一般に、点灯後その放射出力および電気特性が安定になるまでに20分以上の待機時間が必要である。

(2) 測定環境

殺菌ランプは、その最冷点の温度によって放電の状態が決まり、その温度により、光出力およびランプの電気特性が変化する。したがって、測定時の周囲温度を一定に保つ必要がある。周囲温度は $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ で無風とする。また、図2.2に示すようなハウジングを使用して、周囲の温度擾乱の影響を避ける必要がある。なおJIS C-7605(1977)「殺菌用低圧水銀放電管」¹⁾では、測定時の周囲温度を 20°C の無風状態と規定し

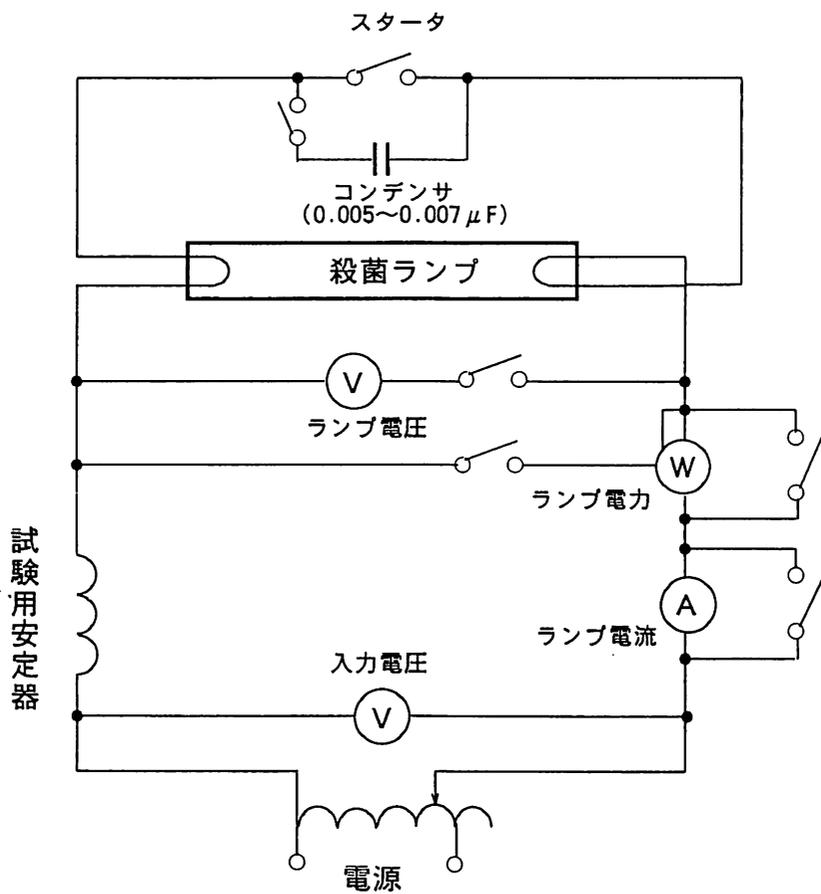
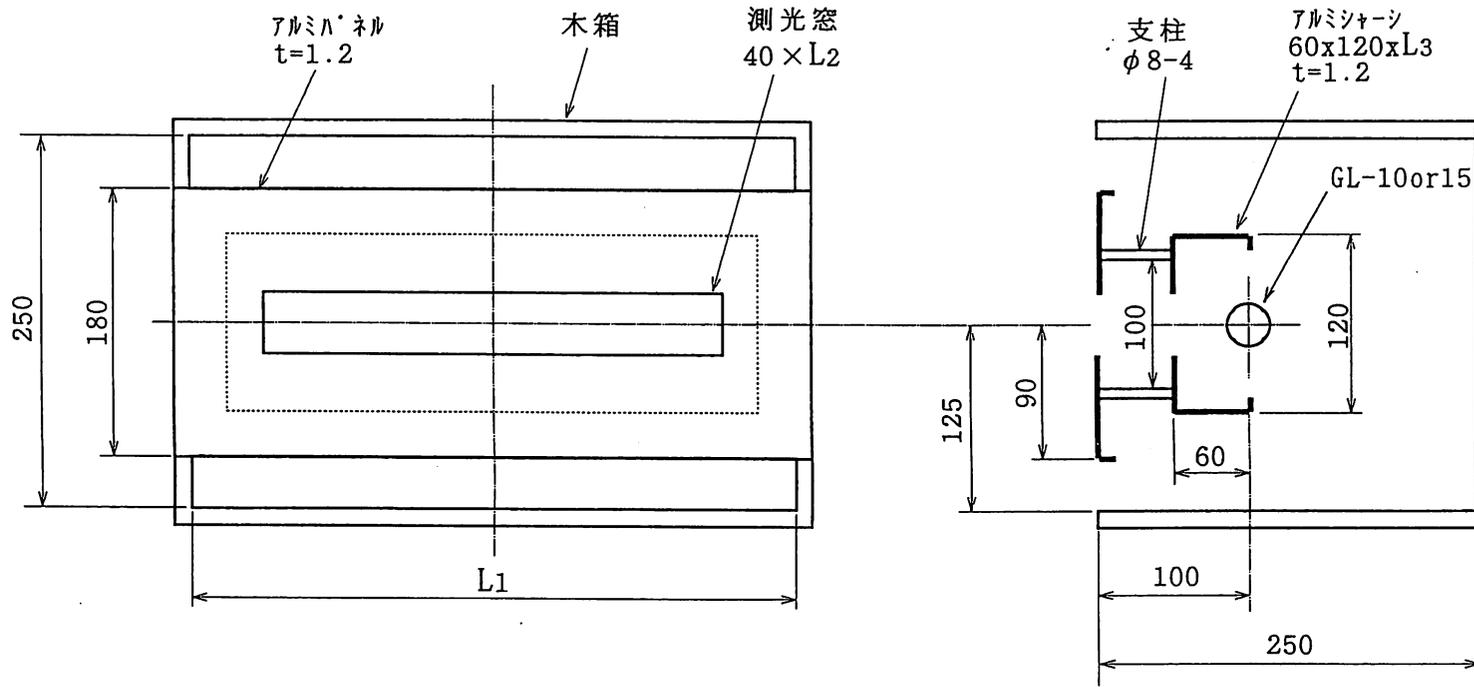


図 2. 1 殺菌ランプの点灯回路

表 2. 1 試験用安定器の電気特性

適合ランプ の種別	定格入力 電圧(V)	基準電流 (A)	インピーダンス (Ω)	力率
GL-10	100	0.230	355 ± 2	0.075 ± 0.005
GL-15	100	0.300	244 ± 1	0.075 ± 0.005

[6]



	GL-10	GL-15
L1	400	520
L2	300	420
L3	350	500

図 2. 2 GL-10、GL-15 点灯用ランプハウス

ているが、これは規格制定時の I E C に準拠していたもので、その後の I E C 改訂にと
もない、「測光標準用放電ランプの全光束測定方法 J I S C 7607-1991」²⁾などの関
連 J I S が変更されているので、ここでは新しい I E C に準拠して 25 ± 1 °C とした。

(3) 常用標準放射源の値の有効期限

常用標準放射源の使用に当たっては、点灯時間を記録、管理し、累計時間が 100 時間
以内で且つ、有効期限（最大 2 年）以内に再度校正すること。（照明学会・技術基準 J I
EC-002-1993 に準ずる。）

(4) 値付け結果の表示方法

常用標準放射源の値付け結果には、原則として次の事項を記載する。

(a) 値付けした常用標準放射源に関する事項

- ・ 常用標準放射源の名称、形名、メーカー名、ランプ番号
- ・ 測定日、データ有効期限
- ・ 試験機関名、試験者名

(b) 点灯条件に関する事項

- ・ 設定電気条件 （例：ランプ電流 230 m A 一定）
- ・ 電源周波数
- ・ 使用した試験用安定器

(c) 測定装置に関する事項

- ・ 測定距離
- ・ 使用した受光器の番号
- ・ 電気計器の形式、番号（測定モード）

(d) 値付け結果

- ・ 253.7 nm の放射照度
- ・ 値付け時の放射源の電氣的測定値
（ランプ電力、ランプ電流、ランプ電圧、入力電圧）
- ・ ランプ周囲温度、室温

2. 2 受光器標準による 254 nm 常用標準放射源の値付け

受光器標準とは、分光応答度の絶対レベル（例えば $\mu A / c m^2$ ）が付けられた安定な放
射検出器であって、実用的にはシリコンフォトダイオードが用いられる。これは、電子技
術総合研究所やその他の研究機関で値付け・供給に応じるので照会するとよい。もし、分
光応答度が相対レベルでしか付けられていないときは、特定の一点の波長または、ある波
長域のトータルの分光応答度を絶対レベルで求めれば、それによって相対値の付けられた
全波長域の絶対レベルが求められる。絶対レベルを求める方法としてはシリコンフォトダ

イオードの自己校正法や分光放射照度標準電球、または光度標準電球と広帯域フィルタによる方法がある³⁾。

2. 2. 1 254nm 常用標準受光器を仲介した値付け方法

この方法は、波長254nmの絶対応答度が値付けされた標準受光器を使って、波長254nmの常用標準受光器（波長254nm付近にのみ感度を持つ）に絶対応答度の値付けを行い、この常用標準受光器でGL-15などの254nm常用標準放射源の値付けをするものである。

(1) 受光器の値付け（自己校正法）

シリコンフォトダイオードを用いて、その自己校正と相対分光応答度測定を組み合わせた波長253.7nmの放射照度の値付け方法について解説する。

シリコンフォトダイオードの自己校正法は、ある波長の放射に対するフォトダイオードの絶対応答度を、その内部量子効率と表面反射率から求める方法である。これにより黒体炉や二次標準である光度標準電球や全放射照度標準電球などを使用せずに、シリコンフォトダイオードそのものの物理特性から、直接その素子の絶対応答度の値付けを行なうことができる⁴⁾⁵⁾が、現段階では、適用できる波長域が可視域に限られ、波長253.7nm付近の紫外域においては十分な精度が得られない。これは、波長の短い、すなわちエネルギーの高いフォトンがシリコンフォトダイオードに入射すると、フォトン1個に対して発生した一対の電子と正孔が余剰のエネルギーを運動エネルギーとして持ち、それが衝突電離を引き起こし、さらに複数の電子正孔対が発生するimpact ionization効果が生じるため、内部量子効率が1以上になるからである⁶⁾。そこで、現時点で高い精度が得られることが確認されている波長632.8nmにおいて⁷⁾⁸⁾シリコンフォトダイオードの絶対応答度を自己校正法によって求め、その値と、熱形検出器を相対分光応答度標準とした比較測定で求めた波長632.8nmと253.7nmの相対分光応答度との比から、波長253.7nmの絶対応答度を導く。

絶対応答度測定用のシリコンフォトダイオードとしては、低容量拡散型のS1337-1010 BQ(浜松ホトニクス社製)の前面ガラスを除去したものをを用る。この素子は、n層に不純物濃度の低い高抵抗型を使用し、空乏層を大きくしていることなどから、632.8nmにおける自己校正法で、高い精度で絶対応答度の測定が可能であり、また紫外波長域でも高い応答度を持つため波長253.7nmでの使用に適することがすでに確かめられている⁷⁾⁸⁾。自己校正の測定には、He-Neレーザ（出力0.5mW、ビーム径3mmφ）とビームスタビライザを組み合わせたものを使用して、波長632.8nmにおける以下の値を求める。

(1) 表面反射率 $\rho(\lambda)$ の測定

(2) SiO₂とSiとの境界面における再結合損失 $1 - \epsilon_o(\lambda)$

(3) 空乏層後方のn領域における再結合損失 $1 - \epsilon_n(\lambda)$

上記の測定のうち、(2)のSiO₂とSiとの境界面における再結合損失は、水電極法によるオキサイドバイアス測定により求め、(3)の空乏層後方のn領域における再結合損失は、リバースバイアス測定により求める。これらの値から、シリコンフォトダイオードの波長632.8nmでの絶対応答度を求める。

実際には、オキサイドバイアス測定を行うと、シリコンフォトダイオード自身の特性が変化するため⁷⁾、最初に、2つのシリコンフォトダイオードに対してHe-Neレーザによる出力を比較測定しておき、一方のシリコンフォトダイオードで、自己校正を行なって絶対応答度(比較測定時の値)を求め、その値からもう一方のシリコンフォトダイオードの絶対応答度の値付けを行なう。

波長253.7nmと632.8nmでのシリコンフォトダイオードの相対分光応答度の比を測定するために、相対分光応答度測定の標準として使用する熱形検出器は、金黒を付けた受光面をもつPVF₂焦電形検出器⁹⁾¹⁰⁾などである。焦電形検出器は、サーモパイルに比べてSN比が約10倍優れ、また、交流動作で使用するため、出力の温度ドリフトが小さい。特に熱吸収層に1~2 torrの窒素雰囲気中で付けた金黒を用いると、紫外から赤外まできわめて波長依存性の少ない分光吸収を示し、相対分光応答度標準として比較的安定な測定が実現できる¹¹⁾。

上記のシリコンフォトダイオードと、開口面積を精密に求めたアパーチャ(開口径6mm)を組み合わせて、波長253.7nm放射の放射照度値が付いた受光器とする。この受光器の構造を図2.3に示す。

なお、自己校正法によって得られた値は、現在の公的標準の値とはトレーサブルでないので、取扱に留意する。

(2) 254nm常用標準受光器への値移し

波長253.7nmの絶対応答度(放射照度)が値付けされた受光器に、正確に分光透過率を測定した干渉フィルタを組合せて波長253.7nm放射のみを測定する254nm常用標準受光器を作ることができる。図2.4にその構造を示す。このとき、個別に測定した干渉フィルタの分光透過率とシリコンフォトダイオードの分光応答度から、この254nm常用標準受光器の応答度を求めようとする、干渉フィルタとシリコンフォトダイオードの受光面との相互反射や干渉フィルタの透過率の不均一性などによる誤差が生じて、正しい絶対応答度が得られない。このため、まず殺菌ランプと別の干渉フィルタを組合せた仮の波長253.7nm放射源を作り、その放射照度を、(1)で説明した絶対応答度を値付けした受光器で測定し(放射源の逆校正)、その値で図2.4に示した波長253.7nm付近の放射のみに感度をもつ受光器(254nm常用標準受光器)を値付けする。波長253.7nmの単一のスペクトルをもつ放射源は、前述のように殺菌ランプGL-15と、波長254nmを中心とする透過帯域をもつ干渉フィルタとで構成する。図2.5に、この測定系を、また図2.6に干渉フィルタ(日本真空光学製 透過帯中心波長254nm)の分光透過特性の例を示す。この干渉フィルタの分光透過率を、シリコンフォトダイオードが感度をもつ波長1100nmまで測定したところ、波長300nm以上では、0.3%前後であり、また波長500nm付近の副透過帯も最大で0.5%以下であった。実用的に使用される殺菌放射源は低圧水銀ランプであり、この500nm付近で輝線放射をもたないので、この副透過帯は低圧水銀ランプに対する殺菌線放射照度を測定する上では問題ないと考えられる。なお、254nm常用標準受光器にGaPフォトダイオードを使用すれば、波長550nm以上に応答しないため、干渉フィルタの副透過帯の影響をさらに低減できる。

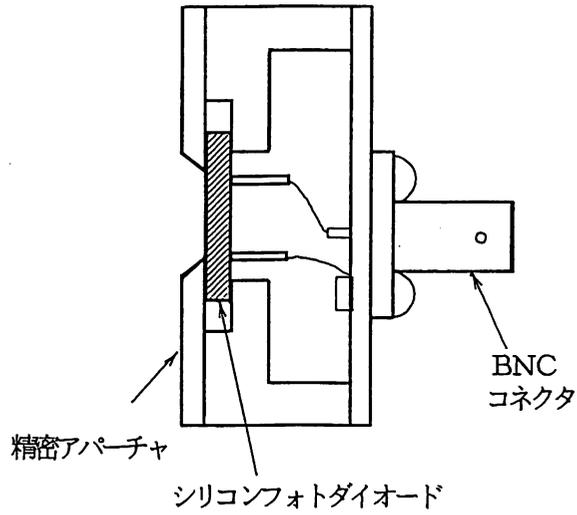


図 2. 3 絶対応答度を値付けした標準受光器の構造

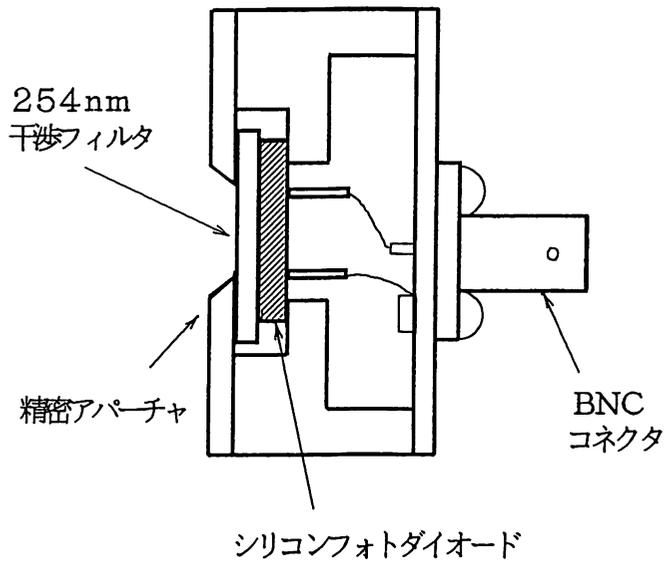


図 2. 4 254nm 常用標準受光器の構造

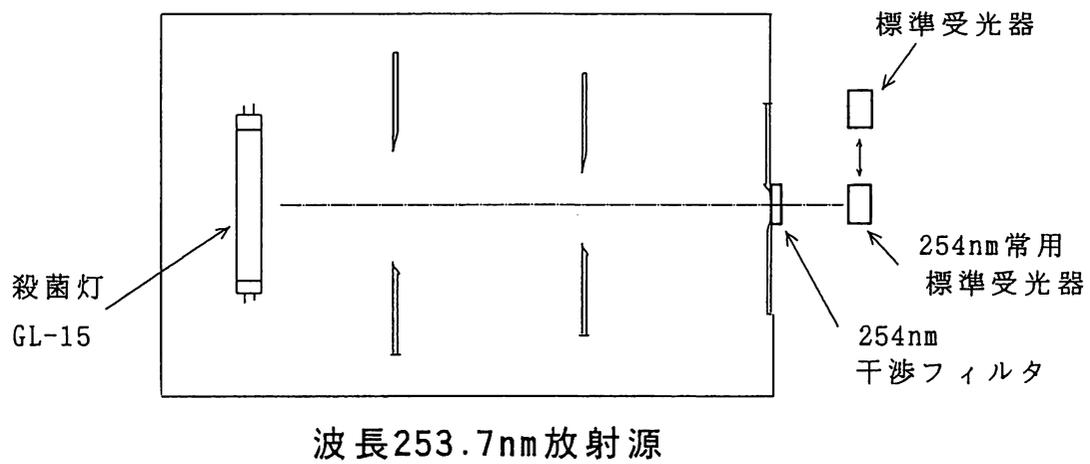


図 2. 5 254nm 単色放射源による
254nm 絶対応答度の値移し

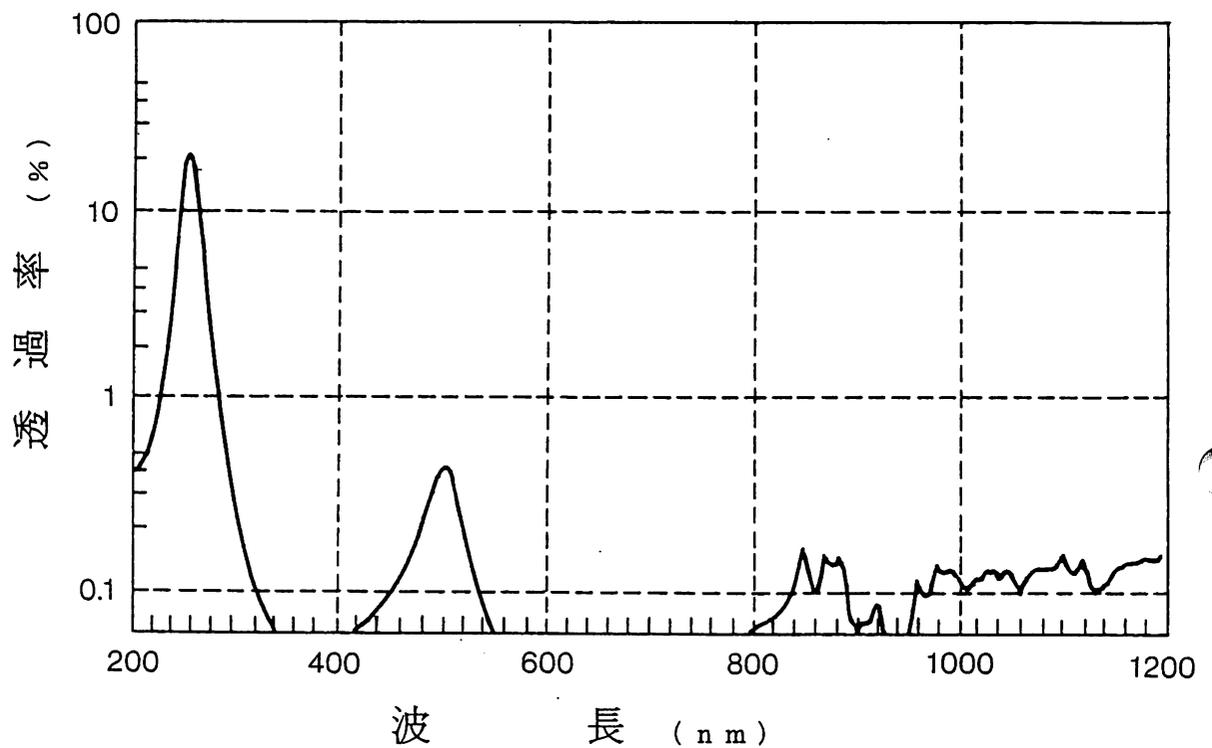


図 2. 6 254nm 干渉フィルタの分光透過特性
(日本真空光学製 透過帯中心波長254nm)

上記の253.7nm放射源の逆校正は、波長253.7nmの絶対応答度の値が付いた受光器を使用するので、使用する低圧水銀ランプ（殺菌ランプGL-15）のスペクトルや干渉フィルタの分光透過率を別に測定する必要はない。この点から従来の熱形検出器とフィルタを使った方法（フィルタの正確な分光透過率が必要）などと比べて値付け精度を向上できるものと考えられる。ただし、放射源と組み合わせるための254nmフィルタを受光器に組み合わせるものとは別に用意しなくてはならない。

シリコンフォトダイオードの自己校正法にもとづく253.7nm放射の絶対放射照度の値付け方法は、国際温度目盛から独立した測定方法であり、可視波長域（632.8nm）では±0.2%程度の確度を得られることが確かめられている⁹⁾。シリコンフォトダイオードの相対分光応答度の測定は、校正に熱形検出器を使用するため、±2%以内の誤差が見込まれるが⁹⁾¹⁰⁾、安定で応答度の高いシリコンフォトダイオードを放射照度の受光器校正に使用するため、各段階の測定で高いS/Nが得られることから、254nm常用標準受光器の値付けの最終確度は±2%程度が期待できる。

(3) 254nm常用標準受光器による254nm常用標準放射源の値付け

図2.7に、このようにして値付けした254nm常用標準受光器によって、254nm常用標準放射源（GL-15）の、距離1mにおける放射照度を値付けする光学系を示す。距離の設定には、254nm常用標準放射源の位置の基準（管中央か管端部か）を明記する。なお、図2.4に示す構造の254nm常用標準受光器の斜め入射光特性の余弦則からのはずれを図2.8に示す。254nm常用標準放射源である殺菌ランプは棒状光源であるため、放射照度の値付けを行う際、254nm常用標準受光器の斜め入射光特性の余弦則からのはずれによる誤差を考慮する必要がある。254nm常用標準放射源にGL-10を使用する場合その発光長は約300mm程度であるため、距離1mにおける受光器の見込み角は、±8.5°であり、GL-10、GL-15の水平配光特性は、ほぼ完全拡散特性とみなせるので、発光端からの放射に対する放射照度測定値の誤差は3%未満である。したがってGL-10の発光部全体に対してこの誤差を見積もっても1%以下であることが予想される。ただし、254nm常用標準受光器の斜め入射光特性の余弦則からのはずれは、使用する干渉フィルタの厚さや開口径、受光器自身の構造により大きくかわるため、254nm常用標準放射源の値付けを行う場合、その特性を把握しておく必要がある。

2.2.2 フィルタによる254nm輝線分離法による値付け方法

この方法は、波長254nmの放射に対する絶対応答度が値付けされている受光器に、254nm輝線を分離するフィルタを組み合わせ、直接254nm常用標準放射源の値付けをする方法である。2.2.1に述べた方法は254nm常用標準受光器を仲介するので、254nm輝線を分離するフィルタの分光透過率測定を必要とせず、フィルタの測定誤差が入らないので、254nm放射計を校正（このとき254nm常用標準放射源の値付けは必要としない。）するときには精度の高い方法である。しかし、254nm常用標準放射源の値付けに対しては、254nm常用標準受光器を仲介するため値付けの誤差が増加する。つまり、254nm放射照度計に正確に値付けしようとする場合は2.2.1の方法がよく、GL-10、GL-15のような放射源

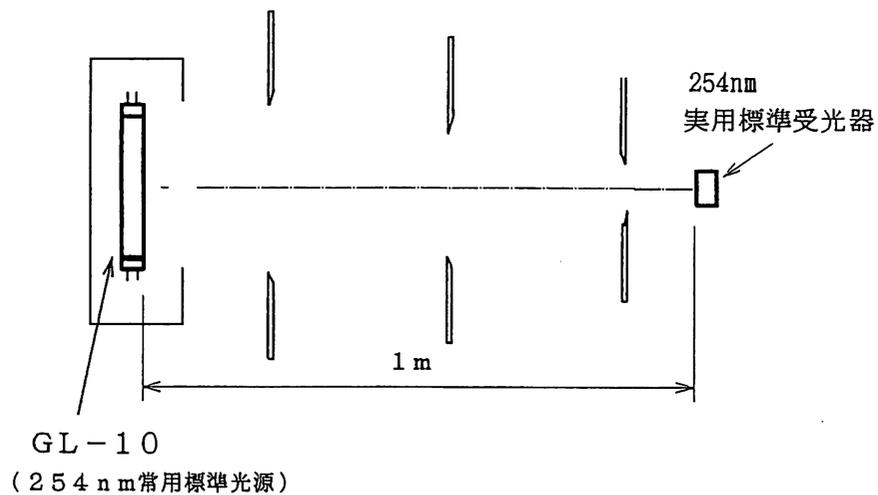


図 2. 7 254nm常用標準光源の放射照度値付け

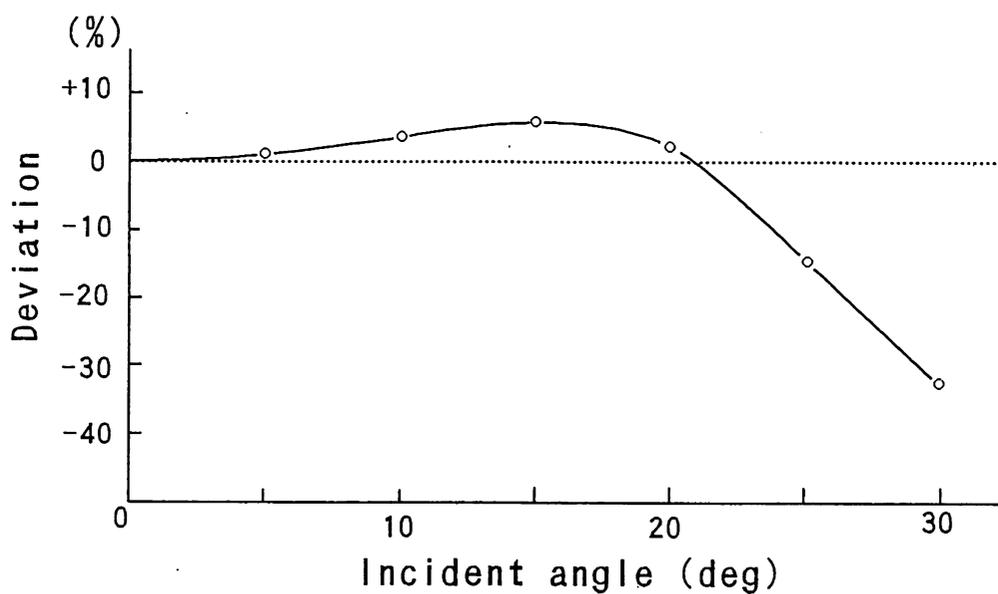


図 2. 8 254nm常用標準受光器の斜め入射光特性の
余弦則からのはずれ

受光素子：浜松ホトニクス製S1337-1010BQ、

干渉フィルタ：日本真空光学製φ30mm 厚さ2mm

に直接値付けをしようとするときは、ここで述べる方法の方が精度が高い。

この方法で使用する帯域フィルタには色ガラスフィルタを用いる。干渉フィルタを使用すると入射角が制限されて誤差を生じやすい。色ガラスフィルタとしては、UV-D33S またはU-330を用いる。しかし、これらの色ガラスフィルタでは254nm より長い波長の303、313nm の輝線放射も入るので、補助フィルタとしてシャープカットフィルタ(UV-29またはUV-30)を使用してその成分を差し引く。

(1) 帯域フィルタ F_1 の254nmにおける透過率 T_{254} の測定

光源として殺菌ランプを使用して、殺菌ランプの254nm放射によって色ガラスフィルタ F_1 の254nmにおける透過率 T_{254} を測定する。図2.9にその光学系を示す。殺菌ランプからの放射を波長254nmに設定した分光器に入射させ、波長254nmの単色放射を作り、シリコンフォトダイオード(波長254nmの放射に対する絶対応答度が値付された標準受光器またはそれと同形のもの)に導く。この分光器とシリコンフォトダイオードとの間の光路に F_1 を出し入れしてシリコンフォトダイオードの出力比から透過率 T_{254} を求める。この測定は、外光が入らぬよう十分遮光して行う必要がある。また、分光器の代わりに254nm用干渉フィルタを用いる場合には、殺菌ランプは発光中央部の幅20~30mmだけからの放射を用いる。 F_1 は、光路に対して少し傾け、シリコンフォトダイオードの反射光が再びシリコンフォトダイオードに入射しないようにする。

次に F_1 の代わりにシャープカットフィルタ F_2 をセットし、 F_2 が254nm放射を遮断することを確認する。

(2) 254nm常用標準放射源の放射照度の値付け

図2.10に測定光学系を示す。まず絶対応答度で値付けした受光器の前に F_1 を置いて、値付けするランプからの入射による光電流 I_1 を求める。次に、 F_1 とランプの間に F_2 を入れて、光電流 I_2 を求める。次の式で、この状態での254nm常用標準放射源の放射照度 E_{254} を求める。

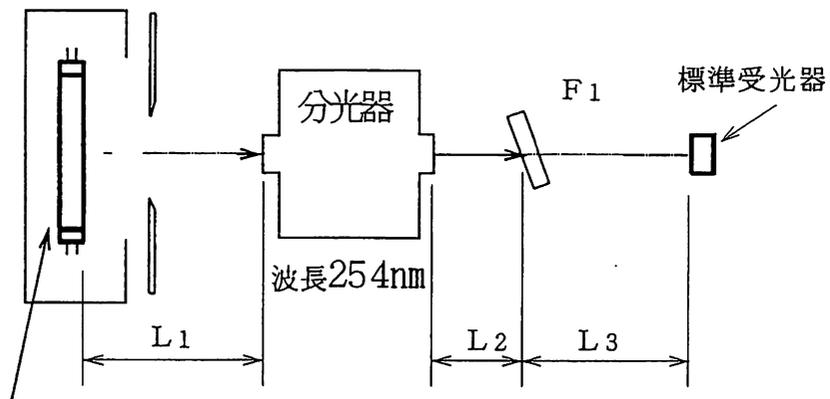
$$E_{254} = \frac{I_1 - I_2'}{T_{254} \cdot S_{254}} \quad (2.1)$$

但し $I_2' = I_2 / T_1$ で、 S_{254} は、受光器の波長254nmでの絶対分光応答度である。 T_1 は、254nmより長い波長の放射に対するシャープカットフィルタの透過率で、 $T_1 = 0.92$ とする。

2.2.3 標準電球とフィルタによる受光器の絶対応答度の値付け

シリコンフォトダイオードに付けられた分光応答度が相対的な値(例えば560nmの応答度を1.000とする)であって、絶対レベルでないときには254nmの放射照度はそのままでは測定できない。このようなときには何らかの手段で絶対レベルを求める必要がある。

2.2.1に述べてあるシリコンフォトダイオードの自己校正法は、正確さの上から最も信頼



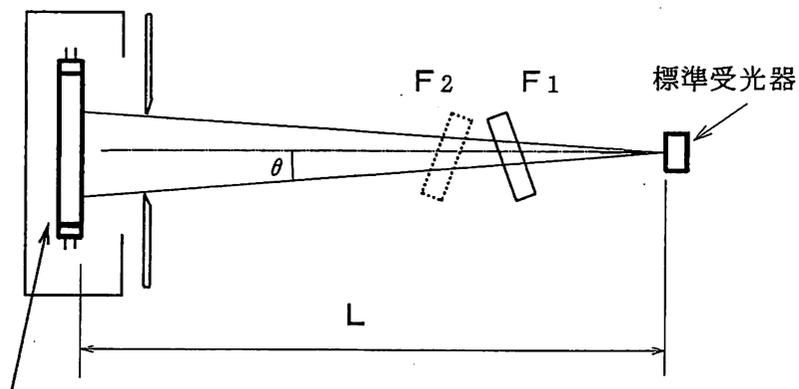
GL-10またはGL-15
(水平点灯)

$L_1 : 100 \sim 200\text{mm}$

$L_2 : 50 \sim 100\text{mm}$

$L_3 : 50 \sim 100\text{mm}$

図2. 9 ガラスフィルタ F_1 の T_{254} の測定光学系



GL-10またはGL-15
(水平点灯)

$L : 500 \sim 1500\text{mm}$

$\theta : 8' \sim 22'$ (GL-15の場合)

図2. 10 254nm放射の値付けの測定光学系

できる方法で、とくに浜松ホトニクス社製のシリコンフォトダイオードS1337-1010は、その内部量子効率が波長633nmで、99.7%以上ときわめて高く、窓材を除去してその表面反射率を測定するだけで、0.5%以下の不確かさで容易に絶対レベルを求めることが可能である。ただしこの方法は、前述したように自分で絶対レベルを求める場合、国家標準とのトレーサビリティが繋がらない。一方、国家標準とトレーサビリティのとれた方法として、分光放射照度標準電球（または光度標準電球）と帯域フィルタによる値付け方法があるので紹介する。

(1) 分光放射照度標準電球と帯域フィルタによる方法

分光放射照度標準電球には、250～2500nmの分光放射照度が与えられている。この波長範囲で適当な帯域フィルタによって、特定の波長域の放射照度（全放射照度）が得られる。標準受光器の相対分光応答度を $R(\lambda)$ 、分光応答度の絶対レベルを $R_a(\lambda)$ とすると、両者の関係は次式で表される。

$$R_a(\lambda) = k \cdot R(\lambda) \quad (2.2)$$

ここで、 k は絶対レベル決定のための応答度定数（単位A/W）である。いま、分光放射照度標準電球の分光放射照度を（単位 $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ ） $P(\lambda)$ 、帯域フィルタの分光透過率を $\tau(\lambda)$ 、帯域フィルタの透過波長帯域を λ_1 から λ_2 とすれば、分光放射照度標準電球と帯域フィルタを組み合わせた場合に得られる全放射照度に対する、受光器の出力（単位A） I は次式で与えられる。

$$I = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

したがって定数 k は、 $P(\lambda)$ 、 $\tau(\lambda)$ 、 $R(\lambda)$ の値および光電出力 I から次式で与えられる。

$$k = I / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

したがって、受光器の応答度の絶対レベルは、

$$R_a(\lambda) = I \cdot R(\lambda) / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

で表される。受光器として用いるシリコンフォトダイオードは応答度が波長1100nmまでであるため、帯域フィルタの分光透過率は、十分広い波長範囲で測定する必要がある。

(2) 光度標準電球と帯域フィルタによる方法

光束 $\phi_v(lm)$ は、標準比視感度 $V(\lambda)$ と最大視感効率 K_m ($683lm/W$) を仲介として、放射束 $\phi(W)$ に変換できるので、分布温度 T_d が既知の、すなわち可視波長域での相対分光分布が既知の光度標準電球と可視のみを透過する帯域フィルタがあれば、光源から $1m$ の距離における可視波長域の放射照度 $E_e(W/m^2)$ は、次式で与えられる。

$$E_e = \frac{L_v \int_{380}^{780} P(T_d, \lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} P(T_d, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (2.6)$$

ここで、 L_v は電球の光度 (cd)、 $P(T_d, \lambda)$ は温度 T_d の黒体の相対分光分布、 $\tau(\lambda)$ は帯域フィルタの分光透過特性である。光度標準電球は、分布温度 $2856K$ で、光度の値付けがなされるため、その相対分光分布は、「標準の光 A」である。この光度標準電球の分光放射照度を $P_a(T_d, \lambda)$ とすれば、定数を k として、

$$P_a(T_d, \lambda) = k \cdot P(T_d, \lambda) \quad (2.7)$$

また、

$$E_e = \int_{380}^{780} P_a(T_d, \lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

したがって k は、次式で表される。

$$k = E_e / \int_{380}^{780} P(T_d, \lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (2.9)$$

これによって得られる k から、光度標準電球の分光放射照度 $P_a(T_d, \lambda)$ が得られ、(1)で示した手順により、常用標準受光器の分光応答度の絶対レベル $R_a(\lambda)$ が得られる。可視波長域のみを透過する帯域フィルタは、例えば $L-42$ 、 $IRA-25S$ 、 $IRA-05$ を組み合わせる。

この方法は、最も普及している光度標準電球を利用することが大きな利点である。

2.2.4 受光器標準から $254nm$ 常用標準放射源への値付けの確かさ

シリコンフォトダイオードの自己校正法にもとづく $253.7nm$ 放射の絶対放射照度の値付け方法は、国際温度目盛から独立した測定方法であり、松下の実験値と、NISTや、わが国の工業技術院電子技術総合研究所の実験値との比較から、可視波長域 ($632.8nm$) では

±0.2%程度の確度が得られることが確かめられている⁸⁾。シリコンフォトダイオードの相対分光応答度の測定は、校正に熱形検出器を使用するため、±2%以内の誤差が見込まれるが^{9) 10)}、シリコンフォトダイオードは安定性がよいので、253.7nm放射照度受光器(殺菌線照度計)の値付けには±2%程度の確度が期待できる。

ここで述べた自己校正法で値付けした受光器による254nm放射照度の値と、従来用いられてきた、黒体放射をもとに値付けされた光度標準電球^{13) 14)}により、その絶対応答度を導いた熱形検出器とフィルタを組み合わせた従来の方法^{2) 3)}および、黒体炉から分光放射照度標準電球を介して分光法により求める方法の、3つの方法により求めた253.7nm放射照度の相互比較は、表2.2に示すとおりである¹⁵⁾。なお熱形検出器は、日本の国家標準の二次標準電球を使って値付けを行なったものであり、分光法¹²⁾は米国のNIST(National Institute of Standard and Technology:旧NBS)において、米国の放射標準を使用して測定を行なった結果である。これらの比較は、2.2.1で述べた254nm常用標準受光器を仲介に使用しておこなったものである。3つの方法による値は、それらの平均値に対して±1.5%以内の差で一致した。

この3つの方法では、それぞれの一次標準が(1)半導体物理の原理による受光器、(2)黒体炉(日本)、(3)黒体炉(米国)と、それぞれ異なる上に、一次標準から253.7nm放射照度を誘導する過程が全く異なる。このように異なる機関(国)で、それぞれ独立した方法で実現された各値のばらつきが、3%(±1.5%)以内であったことから、それぞれの方法の確度がこの範囲内にあり、かついずれの方法でも実用上十分な確からしさが得られると考えられる。

(大久保 和明・松下電器産業㈱)

測定放射源 測定方法	253.7nm放射照度 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	
	GL-15 No.1	GL-15 No.2
自己校正から絶対応答度 を導く方法による値付け	33.84 (-0.7%)	23.34 (-0.9%)
熱形検出器の差動 フィルタ法による値付け	34.3 (+0.7%)	23.9 (+1.4%)
黒体炉から分光測定に よる値付け	34.05 (-0.0%)	23.42 (-0.6%)

表 2. 2 253.7nm放射照度の測定値比較

() 内は、3つの測定値の平均からのはずれ
ランプから受光面までの距離：1m

参 考 文 献

- (1) 殺菌用低圧水銀放電管 JIS C-7605(1977)
- (2) 測光標準用放電ランプの全光束測定方法 JIS C7607-1991
- (3) 中川、大谷、谷治、河合：253.7nm放射照度（殺菌放射照度）の値付け、
照学誌 71-10 646 (昭62)
- (4) Zalewski, E. F. and Geist, J : Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration, Appl. Optics 19-8 1214 (1980)
- (5) Geist, J, Zalewski, E. F. and Schaefer, A. R. : Spectral response self-calibration and Interpolation of silicon photodiodes, Appl. Optics 19-22 3795 (1980)
- (6) Wilkinson, F, J, et al: The near Ultraviolet quantum yield of silicon,
J. Appl. Phys. 54 1712 (1983)
- (7) 大野義弘、西山英夫：シリコンフォトダイオードの自己校正法におけるオキサイドバイアス特性の検討，照明学会全国大会 45 (昭62)
- (8) 大野義弘、西山英夫：可視域におけるシリコンフォトダイオードの自己校正法の精度の検討，照明学会全国大会 100 (昭63)
- (9) 中川靖夫、大谷文雄：受光器分光感度の紫外・可視域での精密測定（1）、
照学誌 66-10 436 (昭57)
- (10) 中川靖夫、大谷文雄：受光器分光感度の紫外・可視域での精密測定（2）、
照学誌 67-10 514 (昭58)
- (11) 中川、大谷、谷治：熱形検出器の黒さと分光応答度、
照明学会、放射の応用・関連計測研究会資料AR85-7 (昭60-6)
- (12) Walker, J. H., Saunders, R. D. and Hattenburg, A. H. : Spectral Radiance Calibrations NBS Special Publication 250-1 (1987)
- (13) 鈴木、南条、羽生、長坂、上田、湊：紫外・可視・近赤外域における分光放射輝度・照度標準の確立、電総研報告 742号 (昭48) 53~54
- (14) 三嶋泰雄：測光の工業標準に関する研究 電気試験所研究報告 694号 (昭44) 31
- (15) Ohkubo, K., Ohno, Y., Nakagawa, Y. : Calibration of 254-nm irradiance based on the silicon photodiode self-calibration technique Applied Optics Vol. 32, No. 25 4815 (1993)

3. 連続スペクトル常用標準

連続スペクトル常用放射源としては、従来からトレーサビリティ体系（電子技術総合研究所、以下、電総研→日本電気計器検定所、以下、日電検→一般ユーザ）に基づき供給されているハロゲン電球（ウシオ電機製しゅう素電球、JPD100V500WCS、目盛り付けされた分光放射照度波長範囲 250～2500nm）が最も一般的なものである¹⁾。しかし、ハロゲン電球はタングステンフィラメントからの放射であり、得られる分光分布は温度約3100Kの黒体放射に類似した特性を示す。そのため紫外域でハロゲン電球の放射照度値は短波長になるにつれ急激に値が低下する。紫外域で用いる放射源としては重水素ランプがある。このランプの放射照度は波長約300nm以下で上記ハロゲン電球の放射照度を上回るが、300nm以上の波長域では放射照度が急激に低下するため、実用的な放射源と言えない。ただし、真空紫外域では有望な放射源である。ここでは、紫外域連続スペクトル常用標準として、ハロゲン電球に比べ紫外域での放射照度が大きく、可視域でも電球と放射照度がほぼ同じレベルになるXeランプを提案したい（ただし、赤外域に強いラインスペクトルがあるので利用可能な波長の上限は800nm近辺と考えられる）。

3. 1 常用標準用Xeランプの選定について

Xeランプを分光放射照度の常用標準として用いるには、安定性が十分で、経時変化が良好なことが必要である。特に経時変化については常用標準特有の使い方（1点灯時間が数時間以下、多数回点灯）を考慮した選定方法が求められる。現在、市販されているXeランプで良好な特性を持つものは150Wタイプである。本委員会では、常用標準に用いるXeランプ150Wの始動特性、配光特性を以下に述べる方法で確認した後、国内5局所で多数回点滅による働程特性を調べ、実用標準としての適性を検討した。

3. 1. 1 測定に用いたランプの概要

本測定に用いたXeランプは浜松ホトニクス製L2273（150W，8.5A）である。自然空冷状態で点灯する。定格電流での始動特性は図3.1に示すように、点灯後約6分ではほぼ安定状態に達する。予備点灯時間としては、15分以上を見ればよい。

3. 1. 2 Xeランプ（150W）の配光特性

分光放射照度の常用標準として用いる場合、配光特性の良否がランプのセッティングに影響を与え、測定値の再現性、さらには測定精度にも影響をおよぼす。L2273の配光特性の一例を図3.2に示す。±25°の範囲で2～3%以内の変化であり、良好な特性である。

3. 1. 3 選定にあたっての測定方法

紫外域における分光放射照度の常用標準としての適性を判定するための多数回点滅による経時変化を測定した。試料は3本を一組として、各試料は予め10時間エージングする（定格電流、点滅回数任意）。これを照明学会紫外線測定専門委員会報告²⁾に基づく以下

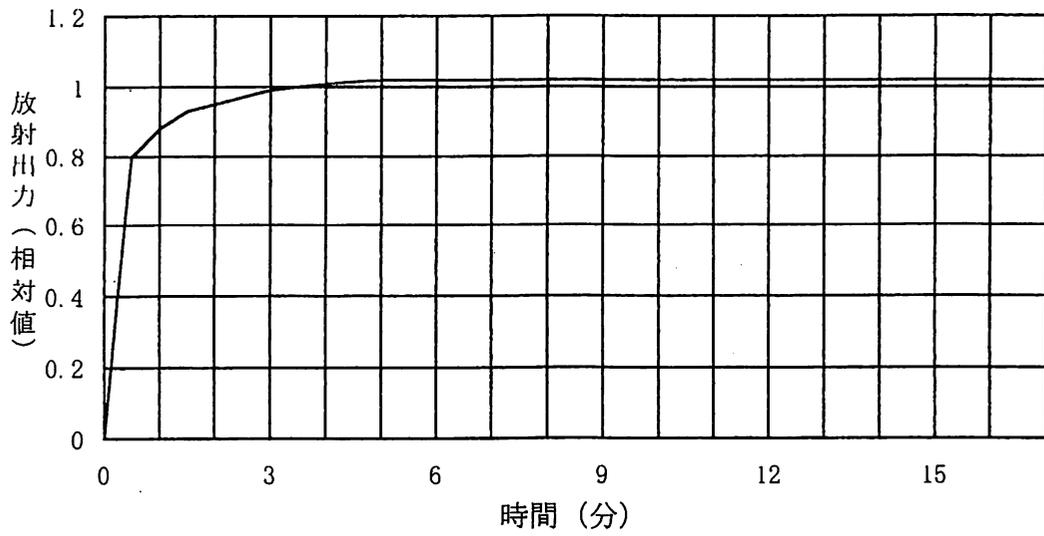


図3. 1 浜松ホトニクスL 2 2 7 3 始動特性

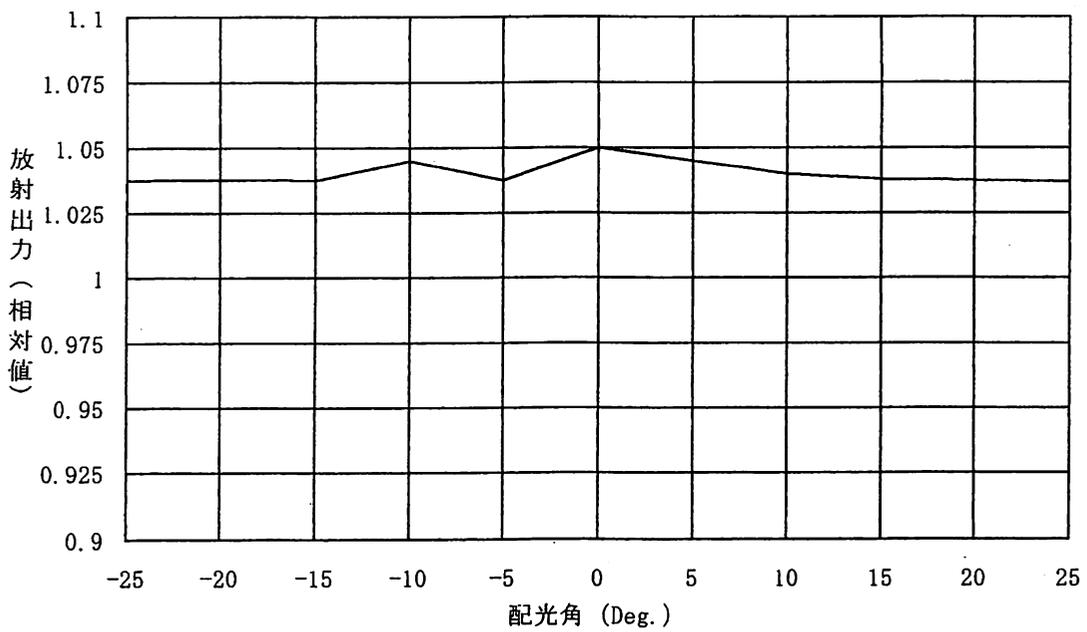


図3. 2 浜松ホトニクスL 2 2 7 3 配光特性 (20h 枯化後)

の方法で点灯安定性、再現性を評価し、最も良いものを経時変化の参照用 (Ref.) とした。
「安定性と再現性の評価 (照明学会紫外線測定専門委員会報告抜粋)」

- (1) 試料点灯後20分、25分、30分の3時点について、各々くり返し5回の読みを取る
(幅約1分)。
- (2) 30分時点の測定終了後、試料を消灯して完全に冷却するまで放置し、さらに(1)と同様な試験をくり返して二度行う (計3点灯)。
- (3) このようにして得られたデータを、次のように整理する。
 - a) 各時点の5回の読みの幅 (%) : 短時間安定性
 - b) 各時点の平均値の20, 25, 30分にわたる幅 (%) : 安定性
 - c) 各点灯時間の平均 (3時点の全平均) の3点灯にわたる幅 (%) : 再現性

ここでの安定性評価は、主として 250~380nm の波長範囲に応答する放射照度測定器 (例えばシリコンフォトダイオードにU330 または UVD33S フィルタをかけたもの) を用いる。分光測定も可とした。点灯の安定 (待機) 時間は15分以上とした。

経時変化測定は上記の安定性試験により得られたRef. ランプで、他の2本のランプを比較測定する。測定器は放射照度計、又は分光測定器を用いる。測定器の選択は各機関の実状による。

(1) 放射照度計による測定

放射照度計による測定は次の4種による。

- a) 波長250nm 付近に応答のピークがあるもの (UV-C 対応)
- b) 波長300nm 付近に応答のピークがあるもの (UV-B 対応)
- c) 波長360nm 付近に応答のピークがあるもの (UV-A 対応)
- d) J I S C 1609 に基づく照度計

測定ごとに、これらの4機種による測定値をRef. との比較で求める。測定距離は1m以上とした。

(2) 分光測定器による測定

分光放射測定を行うときはRef. との比較を原則とするが、分光放射照度標準電球 (ハロゲン電球) との比較でも良い。

波長域 : 250~780 (または800) nm

波長間隔 : 5 nm または 10nm

測定は J I S Z 8724 「光源色の測定方法」または照明学会編「光の計測マニュアル」第7章に記述された手法による。

点灯時間および点滅回数は 100時間 100点灯とした。各測定サイクルは1時間点灯 (15~60分消灯) - 1時間点灯である。夜間等長時間消灯する場合はその旨を記録した。経時測定は10時間、20時間、30時間、50時間、75時間、100時間で行い、一部150時間まで実施した。経時測定のための点灯も点滅回数に含む。測定時は点灯方向、姿勢による誤差

を極力少なくするように注意した。

評価方法は、Ref. の値を1.00または100%とし、

- (1) 放射照度計は使用した計器に対応する波長域ごとに、
- (2) 分光放射測定は波長ごとに試料の値を示す。

なお、分光測定で波長域（たとえばUV-A, B等）ごとの積分量（全放射照度）の値の計算が可能であれば併せて行うこととした。

3. 1. 4 ランプハウス

Xeランプ評価用のランプハウスは埼玉大学提案の図3.3に示すものを用いた。ランプの冷却は自然空冷である。ベースプレート上にアルミチャンネルを立ち上げ、このアルミチャンネルにXeランプ取付用上部・下部受金を絶縁・断熱用碍子（SC303、秋葉原坂口電熱）を用いて鉛直方向に取り付けた。上部受金にはXeランプの位置規制を容易にするためのノッチを設けた。Xeランプの管壁部分はアルミ製のフードで被い、25mmφの開口部より放射を取り出す。フードの両サイドには位置規制用に開閉可能な窓を設けた。

3. 2 Xeランプの動程特性

このL2273Xeランプの多数回点滅による動程特性試験を5機関で行った。2機関は分光測定、3機関は放射照度計による測定である。

(1) 分光測定による動程特性

2機関で行った分光測定に用いた分光器は、ニコン P250, 日本分光PD-25GTMである。測定波長は250~780nm、波長間隔5nmである。経時変化の測定は1機関2本のデータ（いずれも3本を一組とし、内1本をRef.とした。）であり、計4本のデータの平均値である。測定は10h, 20h, 30h, 50h, 75h, 100hで行った（内1機関はさらに120h, 150hの測定も行った）。代表的な波長（250~300nmは10nmおき、~400nmは20nmおき、~750nmは50nmおき）での経時変化を図3.4に示す。点灯時間100hにおいても最大で約2%の変化であることがわかる。これをUV-C, UV-B, UV-A, VIS.の各波長領域ごとに見ると、図3.5, 表3.1に示すように20hで系統的に大きくはずれている点を除けばUV-A, UV-B, VIS., UV-Cの順に良好な結果が得られた。最もはずれているUV-Aでも約1%の変化であり、非常に良好な特性が得られた。

(2) 放射照度計による動程特性

放射照度計による経時変化の測定は3機関（1機関2本のデータ）計6本のデータの平均値である。測定はUV-25フィルタ（UV-Cに相当）、UV-36フィルタ（UV-Aに相当）および可視域を照度計で測定した結果である。経時変化を図3.6, 表3.2に示す。この測定結果も、上記分光測定の結果と同様に最大約2%の変化という非常に良好な結果が得られた。

分光測定、放射照度計いずれの動程特性の結果でも、浜松ホトニクスL2273は常用標準

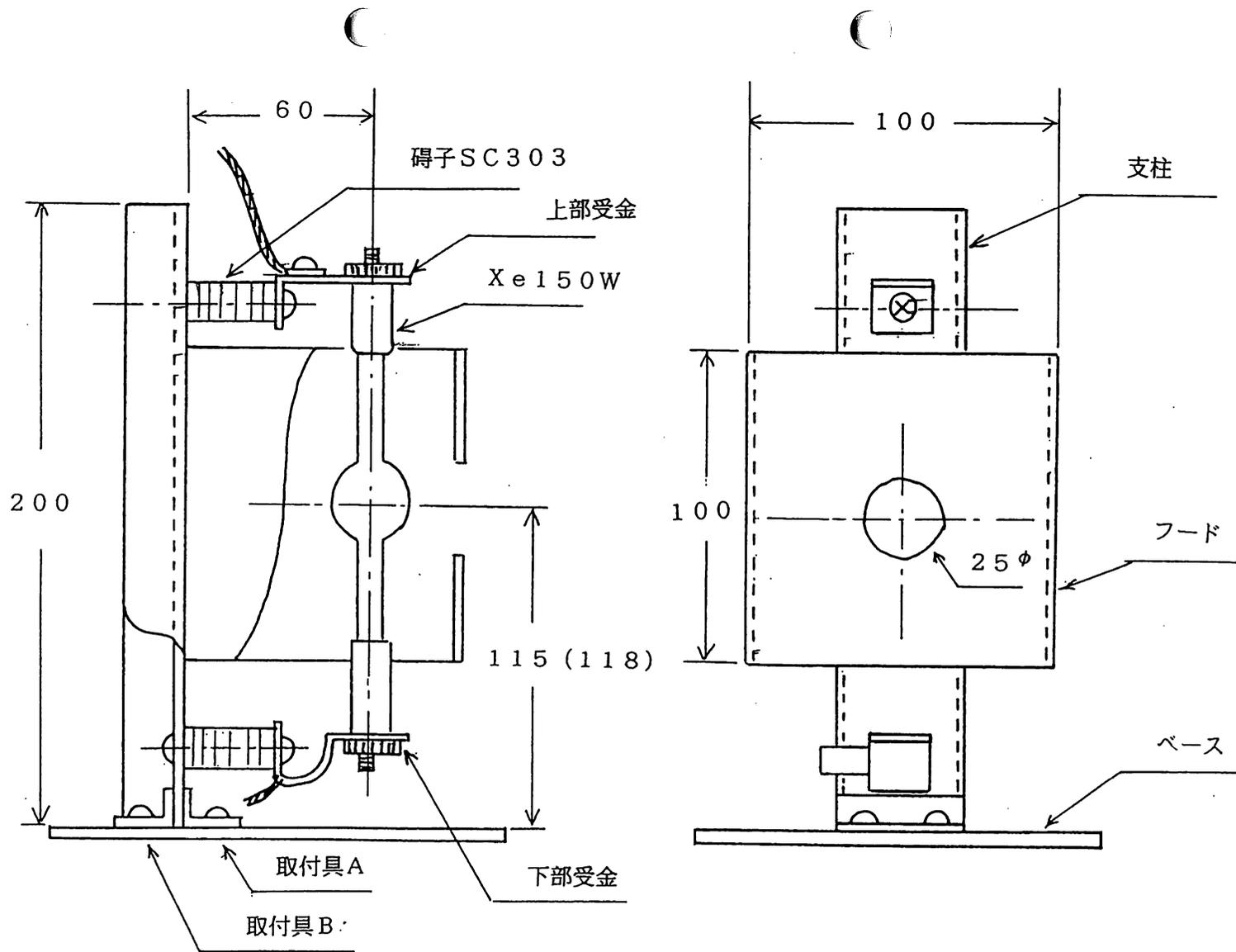


図3. 3 Xeランプ測定用ランプハウス

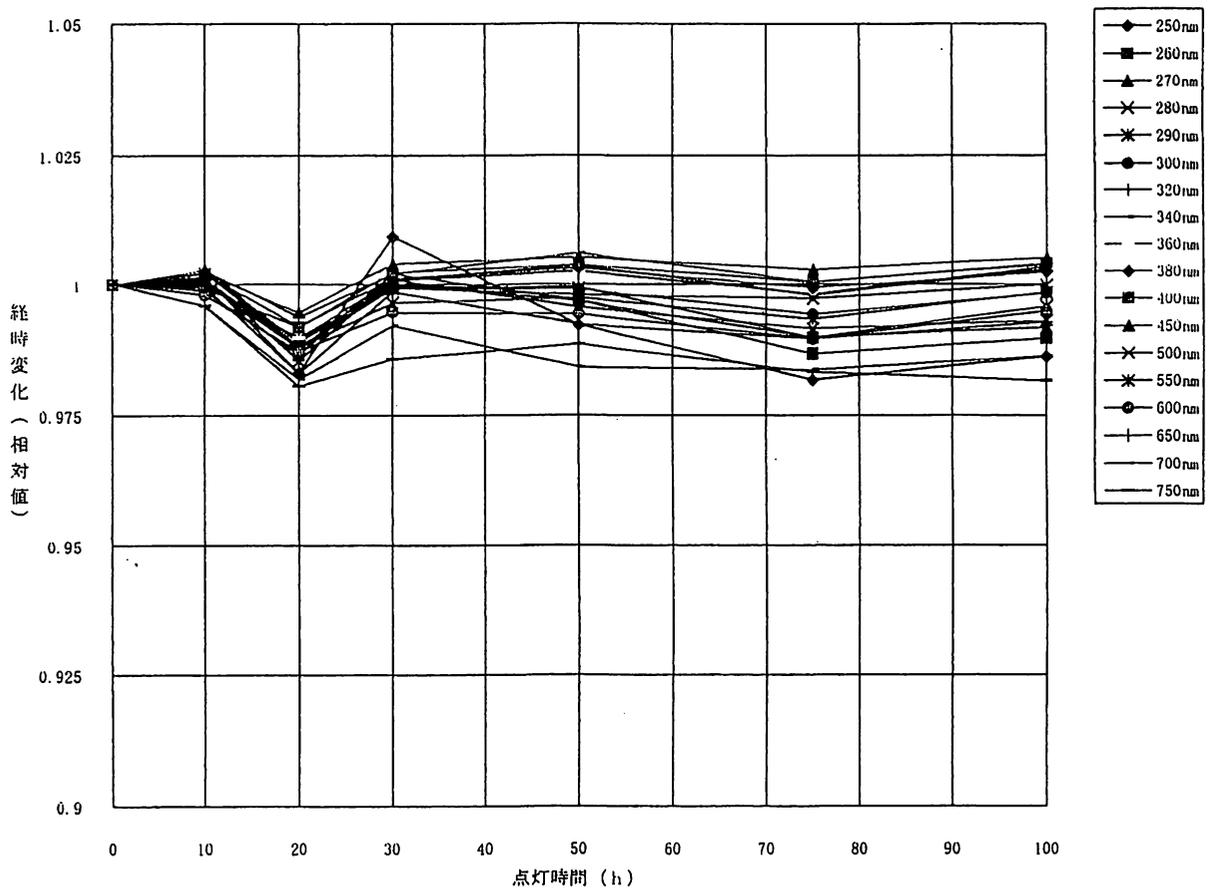


図3. 4 分光測定による浜松ホトニクスL2273の経時変化(4本の平均)

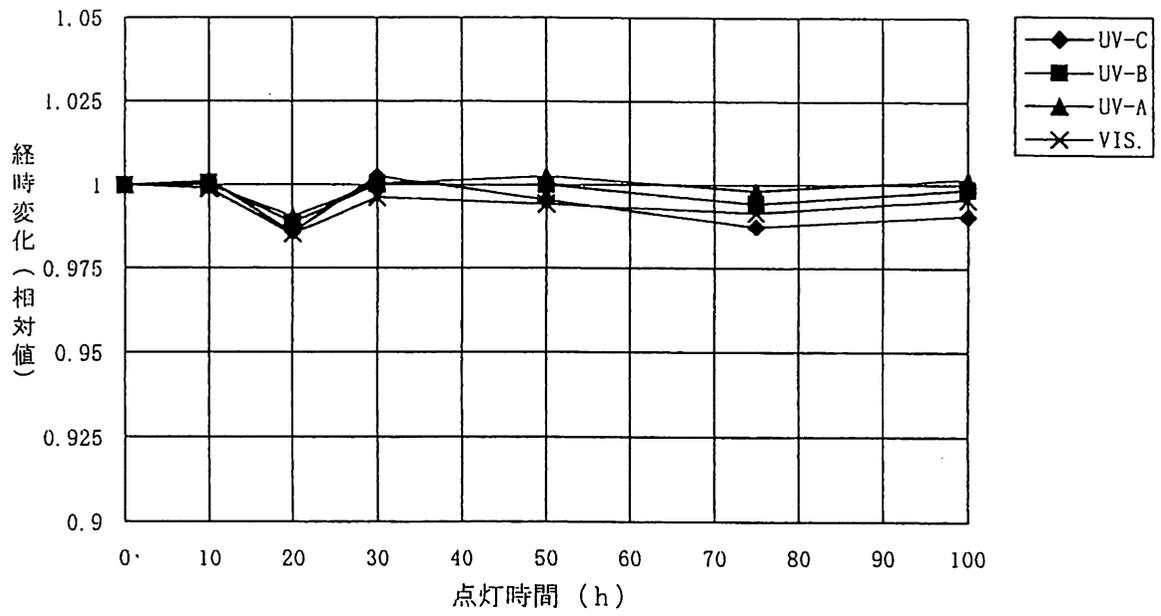


図3. 5 分光測定による浜松ホトニクスL2273の波長域ごとの経時変化
(4本の平均)

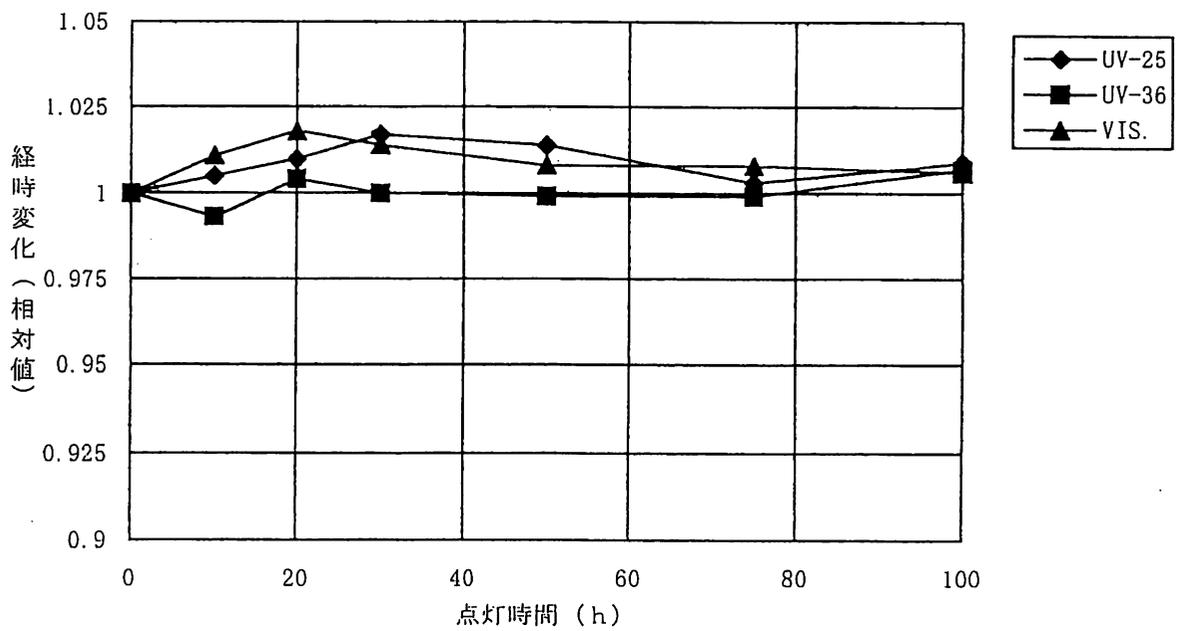


図3. 6 放射照度計による浜松ホトニクスL2273の波長域ごとの経時変化
(6本の平均)

表3. 1 浜松ホトニクスL2273経時変化(分光測定)
 (4本の平均値とばらつき(%)を示す。0hの値を1.000とした。)
 GA2039, 41(岩崎), GA2051, 52(松下)測定

時間 (h)	250~280nm (UV-C)	280~315nm (UV-B)	320~400nm (UV-A)	405~780nm (VIS.)
10	1.001±0.8(%)	1.001±0.5(%)	1.000±0.3(%)	0.999±0.5(%)
20	0.986±1.4	0.989±1.4	0.991±1.5	0.986±1.6
30	1.003±1.9	1.000±1.6	1.000±1.6	0.996±1.9
50	0.996±1.5	1.000±1.4	1.003±1.2	0.995±1.9
75	0.988±2.4	0.995±2.4	0.998±2.2	0.992±2.1
100	0.991±1.9	0.999±2.0	1.002±2.0	0.996±1.8

表3. 2 浜松ホトニクスL2273経時変化(放射照度計測定)
 (6本の平均値とばらつき(%)を示す。0hの値を1.0000とした。)
 GA1033, 34(東芝), GA1036, 37(ニッポ), GA1044, 45(東海大)測定

時間(h)	UV-25 (UV-C)	UV-36 (UV-A)	照度計 (VIS.)
10	1.005±1.4(%)	0.993±2.2(%)	1.011±1.7(%)
20	1.010±3.3	1.004±0.6	1.018±2.7
30	1.017±2.8	1.000±2.1	1.014±1.3
50	1.014±3.0	0.999±1.5	1.008±0.9
75	1.003±3.5	0.990±3.5	1.008±1.1
100	1.009±4.2	1.007±2.5	1.006±2.1

として十分な性能を有することを確認できた。分光測定による1機関で行われた120h, 150hの結果も良好であり、問題なく100h使用できることも確認できた。

3. 3 Xeランプ分光放射照度の値付け

以上の結果から、XeランプL2273は常用標準として十分な特性を持つことが確認できたので、このランプに分光放射照度の値付けをする方法、及び二機関における、その実例について述べる。

3. 3. 1 分光放射照度標準電球について

Xeランプの分光放射照度値はトレーサビリティ体系に基づき供給されている分光放射照度標準(ハロゲン電球)から値付けを行うこととした。

現行の波長範囲250~2500nmの分光放射照度標準は1971年に電総研で確立し、1972年4月より国内の研究機関ならびに産業界への供給が行われている(現在、一般ユーザには日電検より供給)。

この標準の確立には3種類の黒体放射源(金点黒体放射源、ニッケルチューブ黒体放射源、グラファイトチューブ黒体放射源)が使われた。1968年国際温度目盛(IPTS-68)の金の凝固点1337.58Kを分光放射輝度の温度基準とした。二次標準放射源としては、石英窓付きタングステンリボン電球(GE30A/T24/13)を用い、分光放射輝度の値付けが行われた。分光放射輝度から分光放射照度への変換を分光器の入射光学系と拡散反射板を用いて行い、当時、新たに製作したウシオ電機株式会社製のしゅう素電球(JPD100V500WCS)に分光放射照度を値付けし、同型の電球に値付けすることによって供給を行い、現在に至っている。しかし、一次標準とした黒体からの紫外放射が微弱なため、紫外域に関しては当時から目盛りの不確かさはかなり大きいとみられていた。

電総研では1981年より電子蓄積リングTERASが稼働し、そのシンクロトン放射(SR)は紫外域において強く、かつ分光分布の標準として使うことができるので、分光放射照度標準電球からの放射とSRとを比較測定し、その結果に従い500nmより短波長の分光放射照度標準値に対する修正率を求めた³⁾。また、1990年国際温度目盛(ITS90)の採用により金の凝固点温度が1337.58K→1337.33Kになったので、プランクの式に基づいて計算すると、たとえば波長250nmでは0.8%、300nmでは0.7%、400nmでは0.5%、500nmでは0.4%、値を小さくする修正が必要になった。ただし、電総研の分光放射照度標準の絶対値は、金点黒体の分光輝度に基づく値と電力置換型放射計に基づく値との平均値であったので、電総研の標準値に対する修正率は2分の1になる。以上2種類の補正を組み合わせ、500nmより長波長についてはITS90の採用による補正を施し(2分の1)、500nmより短波長についてはSRとの比較測定によって求めた分光分布に合わせる修正を施した⁴⁾。得られた修正倍率は表3.3に示すとおりである。

電総研は上記に基づく分光放射照度標準値の変更を行い、平成6年1月1日より実施した。従来の分光放射照度標準電球に関しては、修正倍率を掛けることで修正後の値と同様に使用することができる。

表3. 3分光放射照度標準値の修正倍率

波長 [nm]	修正 倍率	波長 [nm]	修正 倍率	波長 [nm]	修正 倍率
250	0.9318	500	0.9980	1100	0.9991
260	0.9541	520	0.9981	1200	0.9992
270	0.9671	540	0.9981	1300	0.9992
280	0.9587	560	0.9982	1400	0.9993
290	0.9559	580	0.9983	1500	0.9993
300	0.9756	600	0.9983	1600	0.9994
310	0.9727	620	0.9984	1700	0.9994
320	0.9699	640	0.9984	1800	0.9994
330	0.9701	660	0.9985	1900	0.9995
340	0.9703	680	0.9985	2000	0.9995
350	0.9706	700	0.9986	2100	0.9995
360	0.9708	720	0.9986	2200	0.9995
370	0.9746	740	0.9986	2300	0.9995
380	0.9785	760	0.9987	2400	0.9995
390	0.9824	780	0.9987	2500	0.9996
400	0.9862	800	0.9988		
420	0.9911	850	0.9988		
440	0.9960	900	0.9989		
460	0.9985	950	0.9989		
480	1.0010	1000	0.9990		

3. 3. 2 測定条件ならびに測定方法

ハロゲン電球 (JPD100V 500WCS) を用いた分光放射照度の、波長範囲は250~2500nmと広範囲であり、値は距離50cmで目盛られている。150W Xeランプの場合は波長範囲は250~800nm (あるいは780nm) であり、距離は上記ハロゲン電球から値を目盛るときには紫外域の放射出力比の相違から50cm以上 (例えば60, 70cm) とする方が測定が容易になる。ハロゲン電球またはXeランプの値がつけられた距離または値を付ける距離に拡散反射板 (BaSO₄、Halon圧着板等) を用い、拡散反射光を入射光学系によって分光器の入射スリットに導く。分光器は紫外・可視用を用いる (たとえばシングル・グレーティング分光器, プリズム・グレーティングダブル分光器)。シングル・グレーティング分光器の場合2次光カットフィルタを有効に選択し、迷光を十分に除去する必要がある。検出器には光電子増倍管を用いる。拡散反射板を入射光学系に含むため、直流測定はS/Nの点で不利であり、通常はチョップとロックインアンプを用いた交流測定による。光電子増倍管の印加電圧は可変可能であるほうが測定上有利である。

3. 3. 3 測定光学系および測定方法 (電子技術総合研究所)

電総研の分光放射照度測定は、1988年に完成した「分光放射輝度・照度測定装置」⁹⁾ によって行う。この装置のほとんどの可動部分はコンピュータ制御により動作し、自動測定ができる。分光放射輝度および分光放射照度の比較測定のほかに、外部から光ファイバを通じて導入する分光放射束の比較測定、分光応答度の比較測定、分光透過率および分光反射率の測定もできる設計としてある。全体光学系を図3.7に示す。分光放射照度測定に関する装置の仕様を表3.4に示す。

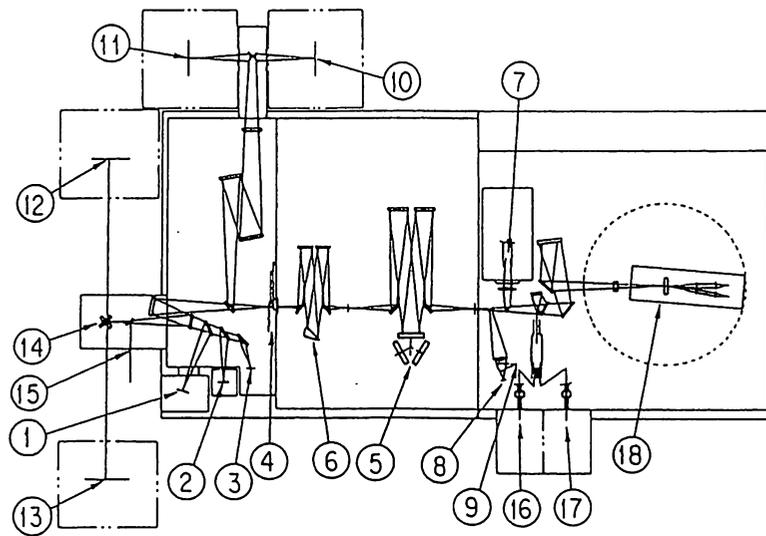
測定は、各測定波長点で拡散反射板 (45°入射/45°反射) を反転して、2本の電球またはランプを比較して行う。光電出力の調整は、光電子増倍管の印加電圧の調整により最適な値を得る (1測定波長点では測定中セットした値を保つ)。また、拡散反射板を反転して測定を行うので、入射方向の違いによる誤差を除去するために、次の順序で測定を行う。

分光放射照度標準電球 → 比較用分光放射照度標準電球 → 測定放射源
(Std.) (test)

測定はロックインアンプによる交流測定である。チョッピング周波数は1kHzである。ダブル分光器であるので、本来迷光の影響は少ないはずであるが、フィルタも併用する。250nm~東芝UV-D25, 375nm~無し, 500nm~保谷Y-46, 600nm~保谷O-54, 750nm~保谷R-68, 1000~2500nm東芝IR-D1Bを光路中に挿入し使用する。

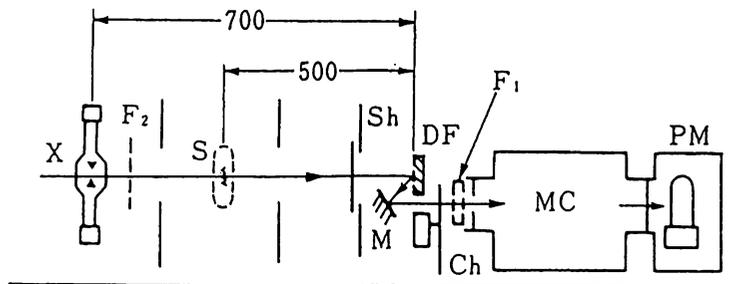
3. 3. 4 測定光学系および測定方法 (埼玉大学)

埼玉大学の分光放射照度測定は、一般市販の分光器 (ニコンG250) により行う⁹⁾。拡散反射板はハロン圧着板を用い、0°入射/45°反射固定で測定を行う。Std., Testの各ランプは入射光学系の延長線上におかれ、測定は波長走査 (測定波長では停止) 方式により行う。光学系を図3.8に示す。測定は以下のような往復測定となる。



- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1 : 内蔵ハロゲン電球 | 10 : 分光放射輝度標準電球 |
| 2 : 内蔵キセノンランプ | 11 : 分光放射輝度比較電球 |
| 3 : 内蔵重水素ランプ | 12 : 分光放射照度標準電球 |
| 4 : チョッパー、フィルタ、シャッタ | 13 : 分光放射照度比較電球 |
| 5 : 主分光器 | 14 : 白色拡散板 |
| 6 : 前置分光器 | 15 : 分光放射束測定用ファイバ導入部 |
| 7 : 内蔵ホトマル | 16 : 比較検出器 |
| 8 : 内蔵Pbs | 17 : 標準検出器 |
| 9 : 内蔵Si-PD | 18 : 分光反射・透過特性測定用
ゴニオメータ |

図3. 7 分光放射照度測定光学系 (電総研)



- X : 試料 (キセノンランプ) S : 標準 (ハロゲン電球)
 F₁, F₂ : 2次光カットおよび減光フィルタ Sh : シャッタ
 D_r : 拡散反射面 (ハロン圧着面) M : ミラー
 Ch : チョッパ (270 Hz) PM : R 955 光電子増倍管
 MC : G-250 形回折格子モノクロメータ (600 本/mm)

図3. 8 分光放射照度測定計 (埼玉大学)

表 3. 4 分光放射輝度・照度比較測定装置の仕様

主分光器（回折格子式モノクロメータ）	
機構的波長範囲	200 nm～2700 nm
測定波長範囲	250 nm～2500 nm
焦点距離	400 nm
F ナンバー	6.8
回折格子	3枚（ブレイズ波長：200 nm, 750 nm, 2500 nm；刻線数はいずれも 600 本/mm） を波長に応じて自動切換
逆線分散	約 4.2～3.0 nm/mm
波長精度	±0.2 nm
波長再現性	±0.1 nm
波長表示	最小目盛 0.2 nm
スリット	幅 0～4 mm ステッピングモータによる入出射連動駆動機構付 コンピュータ制御による自動開閉
波長駆動	ステッピングモータによる駆動；コンピュータによる自動波長送り
前置分光器（プリズム式モノクロメータ）	
焦点距離	250 mm
入射スリット	幅 0～4 mm ステッピングモータによる駆動機構付；コンピュータ制御による自動開閉 高さ 1～10 mm（1 mm ステップ） 手動開閉
出射スリット	主分光器の入射スリットと共用
波長駆動	主分光器の波長駆動と連動
フィルタ	コンピュータ制御による自動切り換え
チヨッパー	1 kHz 光路脱着機構付（手動）
シャッター	ソレイド駆動；コンピュータ制御による自動開閉
白色拡散板（コダック硫酸バリウム圧縮成形；直径 50.8 mm，厚さ 9.5 mm）	
光路切換	コンピュータ制御により DC モータで回転
検出器（光電子増倍管（R 374），Si フォトダイオード（S 2592），PbS セル（P 1026）；いずれも -10°C に電子冷却）を，波長に応じて自動切換（コンピュータ制御）	

分光放射照度標準電球 (Std.) → 測定放射源 (test) → (test) → (std.)

測定結果は往復測定 (2点灯) の平均である。波長範囲は250~800nmである。波長間隔とスリット関数帯域幅は5 nm とした (546.1nm で整合)。ロックインアンプを測定に使用し、チョッピング周波数は270 Hz である。回折格子は1/600mm, プレーズ波長は250nm, 焦点距離250mm, スリット機械幅は入射 0.745mm/出射0.8mm (546.1nmで帯域幅5 nm)。検出器は光電子増倍管R 955、印加電圧は-450Vである。迷光除去用フィルタ (ダイナミックレンジ調整兼用) は、250~390nmは250W-2D, 395~600nmはM30+ND1.5, 605~800nmはA73A+N5+N50を使用する。

3.4 分光放射照度測定例

浜松ホトニクスL 2273の分光放射照度測定例を図3.9に示す。

3.5 ランプハウスと一体化したXeランプ

3.1~3.2で述べたXeランプL 2273について、メーカーの浜松ホトニクス(株)では、取扱の容易さ、位置の再現性の確保、点灯時のパルスによる雑音発生等の防止などの諸点を考慮して図3.10に示すような密閉形のランプハウスを開発した。このランプハウスはスタータ (パルス発生器) と一体化して、シールドを施したもので、ランプハウスは専用のフレームに装着できるようになっており、位置設定が容易に行える。距離の基準点はランプハウスのベースの前面で、Xeランプの中心より約32mm前方にある。なお、ランプハウスの側面には開閉窓が設けてあり、この窓を開いて、光中心 (カソード先端部) の位置を知ることにもできる。また、フレームには3.1.1で述べた分光放射照度標準ハロゲン電球を取り付けるアダプタも装着できるようにして校正する場合の便を考慮してある。このランプハウスは、安定器に接続して点灯するが、Xeランプの電流は安定器に設けた端子で測定できる。

このような構造としたときに、図3.3に示したような開放形ランプハウスで点灯したときの状態との相違が考えられるため、分光分布の測定と3.1.3で述べた手続きで100時間、100点滅の経時測定 (2機関, 4本の分光測定) を行った。

分光分布については、この密閉形ランプハウスで点灯した3本のランプの相対分光分布のばらつき (3本の平均を1.00とした、波長ごとの標準偏差) を示す (図3.11)。さらに、図3.3の開放形ランプハウスで点灯したランプ (この3本とは別のもの) の値を○印で併記して示す。この結果から相対分光分布にはランプハウスの影響は少ないと考えられる。経時測定の結果は表3.5と図3.12のとおりで50hまでは開放形ランプハウスと同等の結果が得られたが、100hでは1.1~2.5%の放射出力上昇が認められた。

4本のばらつきには、開放形、密閉形の差は見られない。したがって密閉形使用のときは50h以上使用した時期での再校正を考慮した方がよい。

(齊藤 一朗・電子技術総合研究所)

(中川 靖夫・埼玉大学工学部)

GA1317 L=700mm I=8.5A

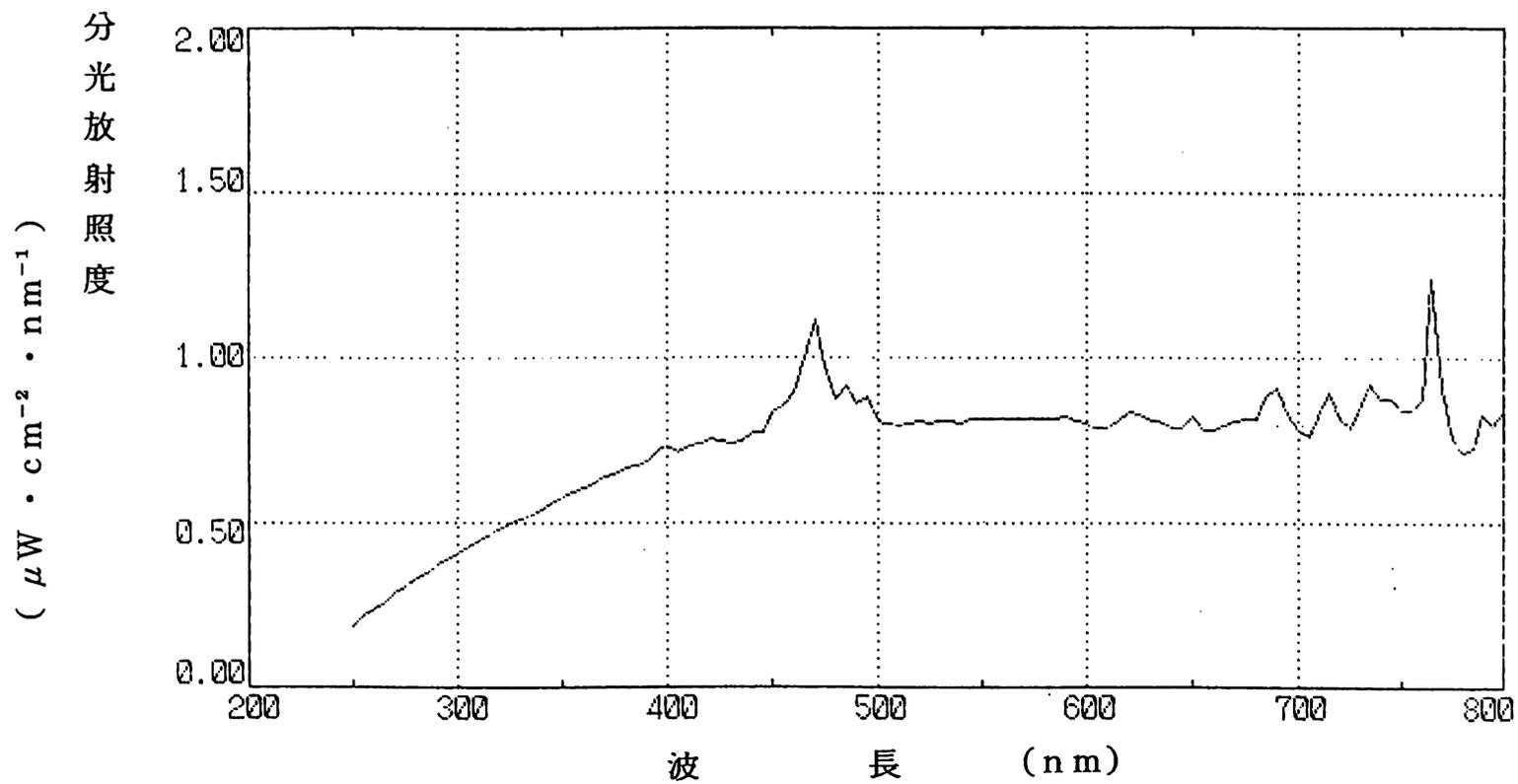


図 3. 9 L2273 X e ランプ 分光放射照度の測定例

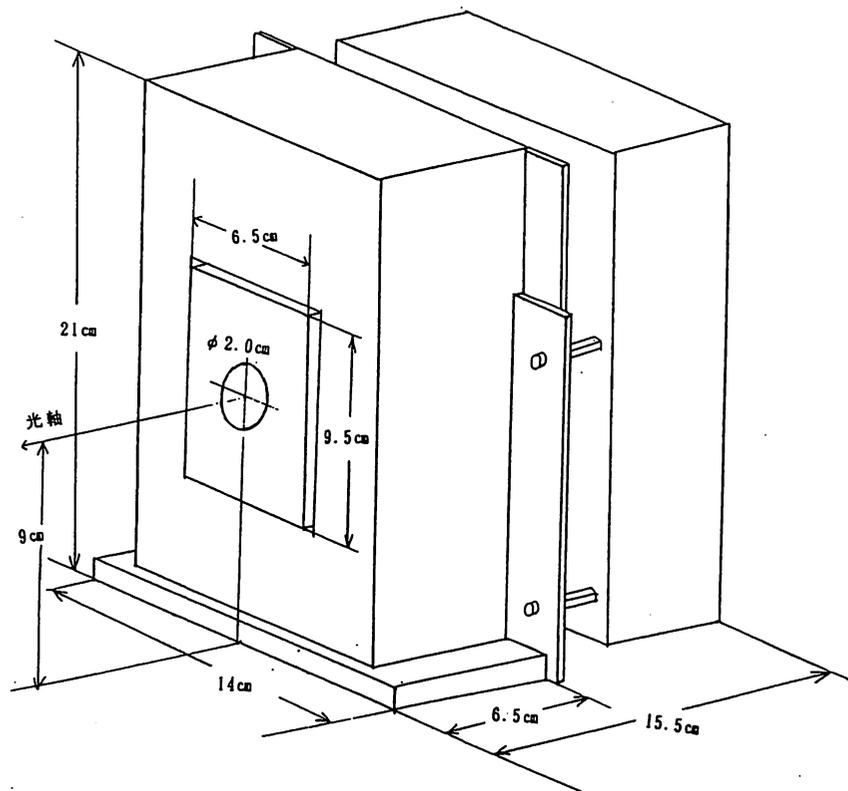


図3.10 密閉形ランプハウスの外観図

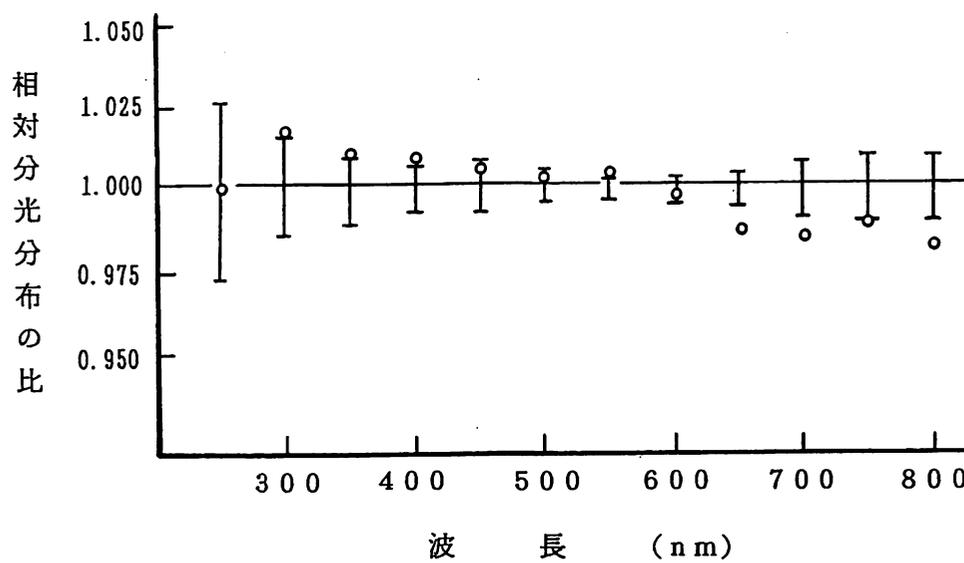


図3.11 L2273 Xeランプの密閉点灯時(3本平均)と開放点灯時(1本)の相対分光分布の比
Iは3本のばらつき(標準偏差), ○は開放点灯時の値(密閉時 1.000)

表3. 5 密閉形ランプハウスによる浜松ホトニクスL2273経時変化測定

(分光測定・4本の平均値とばらつき(%)を示す。0 hの値を1.000とした。)

GA1482, 84 (埼玉大学), GA1485, 86 (浜松ホトニクス) 測定

時間 (h)	250~280nm (UV-C)	280~315nm (UV-B)	320~400nm (UV-A)	405~800nm (VIS.)
10	1.000±0.4(%)	1.002±0.5(%)	1.002±0.4(%)	1.002±0.3(%)
20	0.999±0.4	1.000±0.5	1.000±0.7	0.999±0.6
30	0.999±1.2	1.003±1.1	1.004±0.9	1.002±0.7
50	0.999±1.2	1.005±1.0	1.008±0.8	1.005±0.5
75	1.004±1.5	1.014±1.0	1.018±0.8	1.012±0.9
100	1.011±2.4	1.021±1.5	1.025±1.3	1.020±1.4

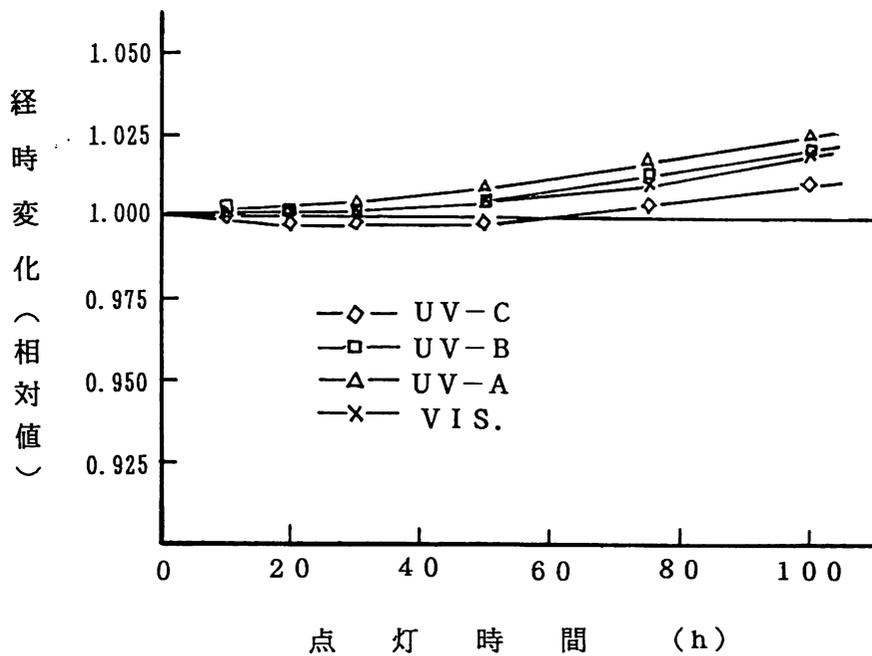


図3. 12 密閉形ランプハウスでの経時変化(4本平均)
(分光測定による)

参 考 文 献

- (1) 鈴木ほか：電総研研究報告 742 (1973)
- (2) 東 堯：照学誌 57 196 (昭48)
- (3) 斎藤ほか：電総研彙報 55 721 (1991)
- (4) 西ほか：電総研彙報 57 52 (1993)
- (5) 齊藤：電総研彙報 57 75 (1993)
- (6) 照明学会編：光の計測マニュアル P 334 (1990) 日本理工出版会

4. 受光器標準

4. 1 シリコンフォトダイオードによる受光器標準

最近の半導体製造技術の進歩から、安定性のよい高品質なシリコンフォトダイオード (SPD) が容易に入手可能となった。

一方、高精度測定法の研究及び測定法の誤差の原因の究明などが行われた結果、十分な精度が期待できるようになり、各国の研究機関で受光器標準として評価されている¹⁾。

受光器標準となりうるために必要な特性 4.1.1~4.1.5 を下記に挙げる。

ここでは、いろいろな測定に幅広く利用されている、S1337-1010BQ (浜松ホトニクス製) の特性を中心に述べる。電総研による受光器標準もこの SPD が用いられる予定である。

この SPD の受光面は、 $10 \times 10 \text{ mm}$ でセラミックケースに収められ、窓材として石英ガラスを使用している。S1337-1010BQ の外形を図 4.1 に示す。

4. 1. 1 分光応答度と受光面内の均一性 (ユニフォーミティ)

使用できる波長域は、 $200 \text{ nm} \sim 1,100 \text{ nm}$ と幅広く、紫外域での応答度も高い。分光応答度の例を図 4.2 に示す。

受光面内での分光応答度の均一性は、 1100 nm 以上の長波長になるにしたがって、ばらつきが見られる。

S1337-1010BQ の例と、S1337-1010BQ ではないが、最近改良された例を図 4.3 に示す²⁾。これらの例では、波長 $200 \text{ nm} \sim 1,000 \text{ nm}$ での均一性は、 1% 以内であり、十分な特性をもっている。

4. 1. 2 直線性

直線性は、入射光束と光電流の比例により評価される。

S1337-1010BQ の場合、図 4.4 に示すように、 $\pm 1.0 \%$ の範囲で 6 桁以上は確保される。

4. 1. 3 経時変化特性

PTB (独の国立研究所) では、1991 年に S1337 と S1227 の分光応答度の安定性を測定した。測定波長 647 nm では、6 ヶ月間で $\pm 0.025 \%$ 、測定波長 257 nm では、3 ヶ月間で $\pm 0.2 \%$ ~ $\pm 0.5 \%$ と安定な結果が得られている³⁾。

4. 1. 4 温度変化特性

周囲温度の変化は、シリコンフォトダイオードの応答度と暗電流の変化の原因となる。

応答度の変化は、温度上昇に伴う光吸収係数の増大が主な原因で、長波長側では温度と共に応答度が増大する正の温度係数を示し、特に最大応答度波長より長い波長域では著しくなる。

シリコンフォトダイオードは、短波長にて吸収損失が小さくなるように作られているため、最大応答度波長より短い波長域では、温度係数は極めて小さい。温度変化特性を

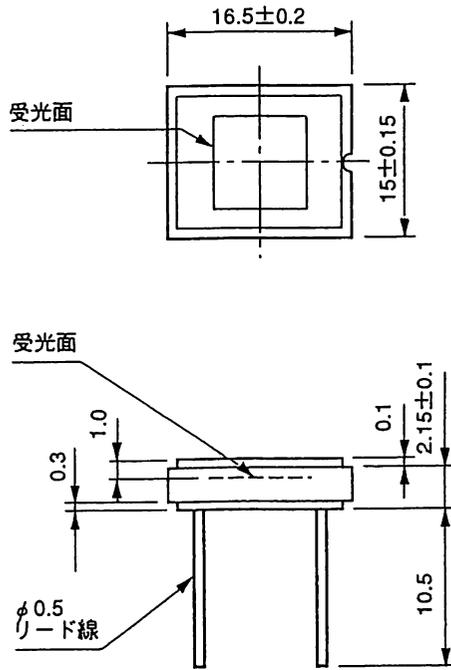


図 4. 1 S1337-1010BQ 外形図

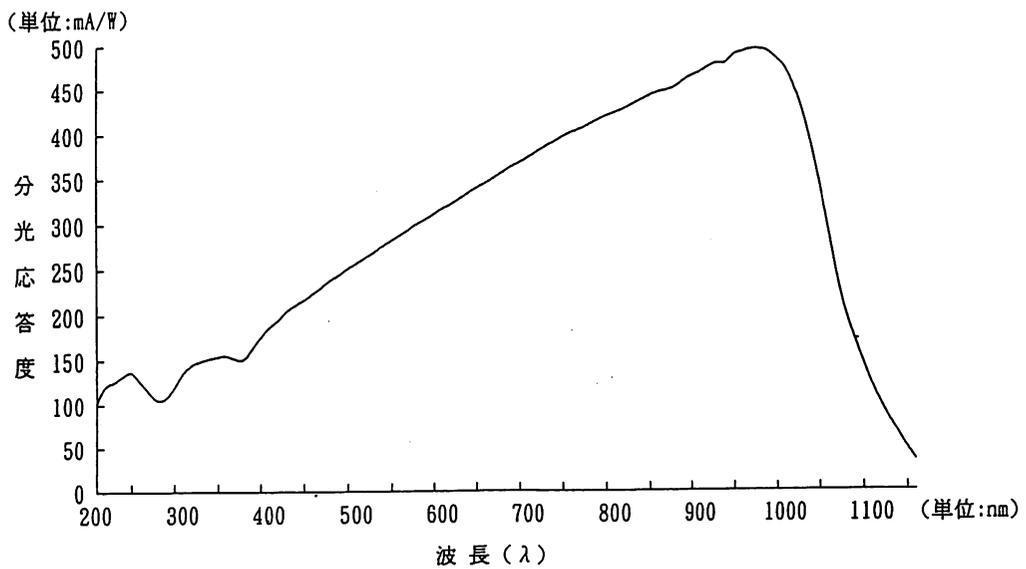


図 4. 2 S1337-1010BQ 分光応答度の例

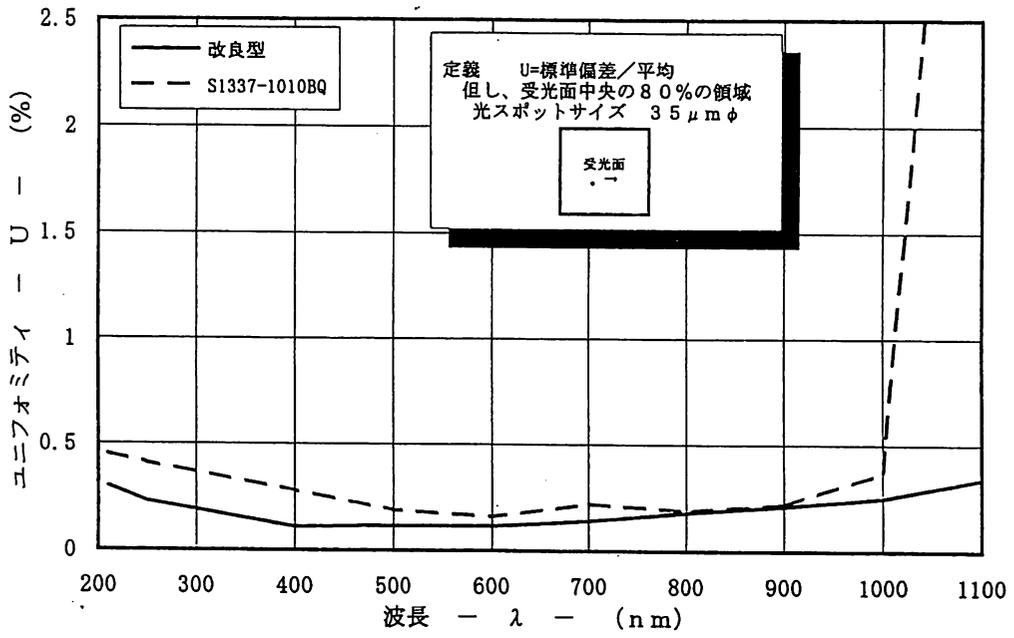


図 4. 3 シリコンフォトダイオード受光面の均一性の波長的变化

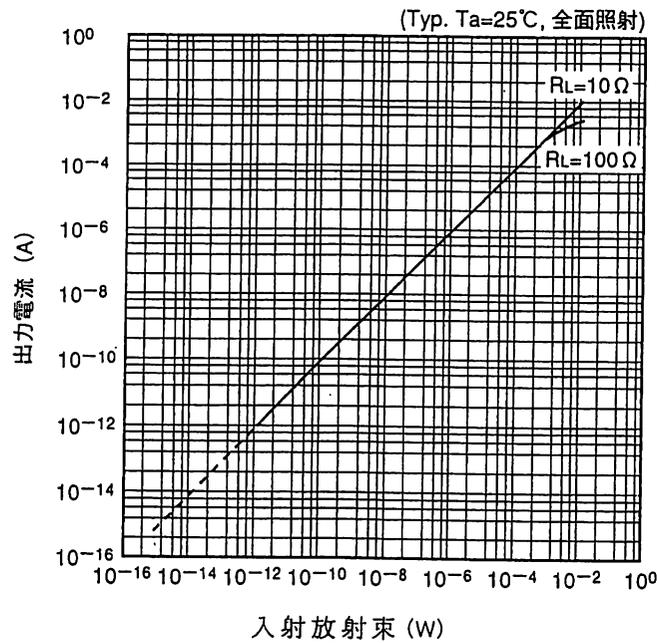


図 4. 4 S1337シリーズの直線性

図4.5 に示す。

これらの結果から200nm～800nmの波長範囲では周囲温度の変化を±2℃程度に保てば、温度による応答度の変動は±0.5% 以内で押さえられる。

4.1.5 取扱方法

シリコンフォトダイオード単体で標準受光器とする場合、素子の固定方法、設定位置や出力端子の接続に注意する必要がある。

例えば、出力端子にケーブルを接続する際に、ケーブルに引っ張られたりすると、素子の固定位置からずれたり、何回も端子を折り曲げたりすると、端子の根本で切断することもある。

また、測定する放射束は有効受光面上に合わせて入射することが望ましく、入射放射が受光面からあふれると、受光面以外の周辺部から発生した光電流が検出され、誤差要因の1つになる。そこで図4.6 に示すようなケースに組み込まれた受光器を用いれば、素子単体より大きくはなるが、外側のホルダーを固定することで、設定位置・傾きなどの再現性が向上し上記のような問題は少なくなる。

また、保護ガラスの窓材にアパーチャを設けることで、受光面以外への照射を防ぐことができる。なお、出力端子はBNCコネクタとなっているので、確実に接続できる。

4.1.6 その他の注意事項

(1) 入射窓は直接素手で触れないこと。

特に紫外放射検出に用いる場合は、窓の汚れが透過率を低下させる原因になることがある。もし、汚れが生じた場合はエタノールを用いて軽く拭き取る。

(2) 受光窓は、鋭利なもの（ピンセットの先）や硬い平面との摩擦を避けること。

微小スポット放射の検出では、受光窓の傷が問題となることがある。

4.2 国内4機関における分光応答度の値づけの結果⁴⁾

本委員会では、紫外域での放射常用標準としてシリコンフォトダイオードを利用することを検討し、その実現のために、まず相対分光応答度（波長250nm～800nm）の測定の国内比較を実施した。

この比較は4機関の参加によって、1992年6月から10月までに行なわれた。

4.2.1 参加機関，試料

今回の比較に参加した機関は下記の4箇所である。

- 1) 電子技術総合研究所
- 2) 埼玉大学 工学部
- 3) 松下電器産業(株) 照明研究所
- 4) 浜松ホトニクス(株)

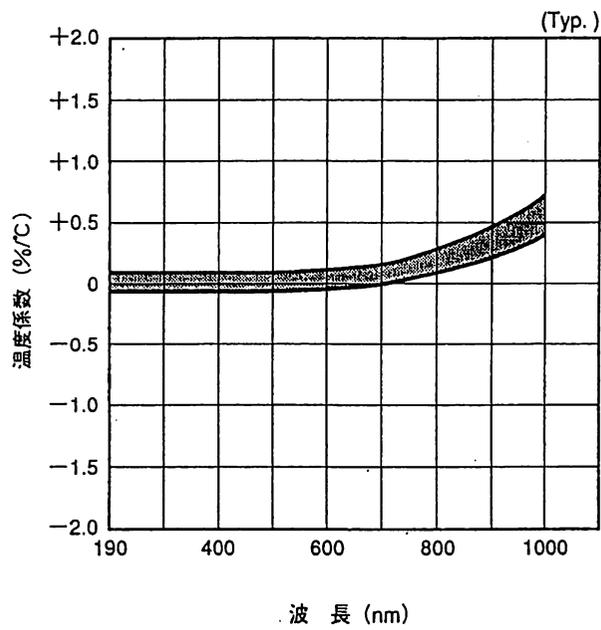


図 4. 5 S1337シリーズの温度特性

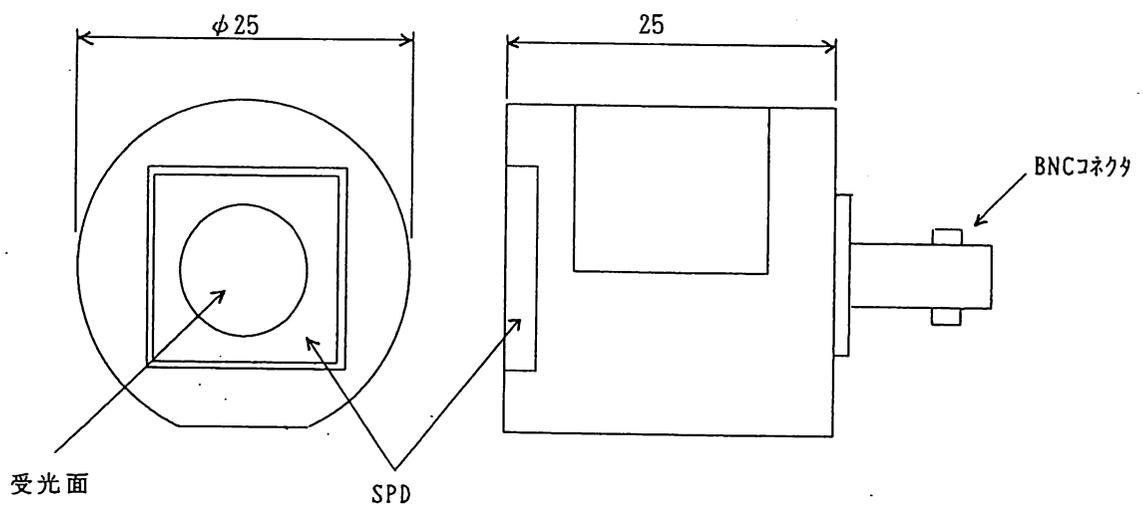


図 4. 6 標準受光器の例

使用した試料はシリコンフォトダイオードS1337-1010BQで、3個を1組として測定対象とした。

4. 2. 2 比較測定と評価の手順

比較測定は、国際比較等で行なわれている方式によった。その手順は次の通りである。

- (1) 参加した4機関で、まず3個の試料を機関固有の標準器によって、分光応答度の相対値 $S(\lambda)$ を値づけする。
- (2) 4機関の内の一機関が幹事局になる。他の3機関で測定した試料(計9個)を幹事局の標準で測定して、幹事局標準による分光応答度の相対値 $S_0(\lambda)$ を値づけする。
- (3) 幹事局は測定した試料をそれぞれの機関に返却する。返送された試料を3機関固有の標準器で再測定して、幹事局測定の前後の相互差を検討する。
この相互差が測定誤差の範囲とみなされれば、前後2回の値の平均値 $\overline{S}(\lambda)$ を求めて $S_0(\lambda)$ との比較値 $\overline{R}(\lambda)$ を求める。

$$\overline{R}(\lambda) = \overline{S}(\lambda) / S_0(\lambda) \quad (4.1)$$

$\overline{R}(\lambda)$ の値は3個の試料に対する平均値について計算する。

- (4) 全機関の $\overline{R}(\lambda)$ の総平均(Grand mean GM) $\overline{\overline{R}}(\lambda)$ を求める。
この場合、幹事局の $\overline{R}(\lambda)$ を1.00とする。{手順(2)}

$$\overline{\overline{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \overline{R}(\lambda), \quad m = 4 \quad (4.2)$$

- (5) 総平均GMに対する各機関の値の偏差 $D(\lambda)$ を求める。

$$D(\lambda) = \overline{R}(\lambda) / \overline{\overline{R}} \quad (4.3)$$

以上の手順について、作業(2)は電子技術総合研究所が、作業(4)と(5)は埼玉大学が担当した。

4. 2. 3 測定方法

試料(S1337-1010BQ)の受光面(有効面積 $10 \times 10 \text{ mm}$)中央部約 $6 \text{ mm } \phi$ を測定対象とした。これは、周辺部では応答度のむらが生ずる懸念があること、周辺にある電極部からの反射光等による誤差となる可能性を防ぐためである。

測定波長域は、 $250 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$ で、測定の波長間隔は 5 nm とした。

(1) 相対値の求め方

分光応答度 $S(\lambda)$ は、全波長に対する平均値応答度 S で規格化した。これは特定の波長の値に重みがかかることを避けるためである。

なお、最終結果(GMに対する偏差 $D(\lambda)$)は波長 560 nm の値 $D(560)$ を1とし

て規格した。

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{\lambda i} \Delta \lambda \quad (4.4)$$

(2) 測定装置

4 機関における測定装置の概要を表 4.1 に示す。

各機関が使用した装置、光学系、標準器はそれぞれ異なっている。

4.2.4. 結果と評価

以上の測定は1992年に、4.2.2 で述べた手順(1)は6～7月、(2)は8月、(3)は10月に実施された。結果は次の通りである。

(1) 測定の精密さと安定性の評価

ある機関(例えば機関A)で測定した試料の相対分光応答度 $\bar{S}_A(\lambda)$ と、幹事機関で同じ試料を相対分光応答度測定した相対分光応答度 $S_0(\lambda)$ の比、 $\bar{R}_A(\lambda) = \bar{S}_A(\lambda) / S_0(\lambda)$ は、両機関の測定が充分安定に行なわれていれば、3個の試料について測定誤差の範囲で等しい値になるはずである。言い換えると、各機関に配布された試料について、前記した $\bar{R}(\lambda)$ のばらつきを見れば、測定の安定性を推定することができる。これを3機関について波長域ごとに求めてみた。波長域はCIEの区分を用いて、400nm～800nm(可視域)、315nm～400nm(UV-A)、280nm～315nm(UV-B)、250nm～280nm(UV-C)とした。各機関の第1回目(幹事局への送付前)の測定値による結果を表4.2に示す。この値は各機関の3個の試料の $R(\lambda)$ の標準偏差の波長域ごとの平均(二乗和平均)である。

この結果、1機関のUV-Cにおける値を例外として、すべての値が $\pm 0.5\%$ 以内に入っており、幹事機関および各機関はいずれも十分に精密な測定を行なっていることが分かった。

(2) 測定の再現性の評価

幹事機関の測定をはさんだ、3機関でも前後2回の測定値を比較すると、試料の経時的な変化を含めた測定の再現性が評価できる。表4.3にその結果を示す。この表の値は2回の測定の標準偏差 σ で示した(測定値の幅 $d = 1.13\sigma$ である)。すべての測定値は $\pm 1\%$ の範囲に入っており、これも十分の満足できる値である。

なお、機関Cの測定は前後の測定をそれぞれ異なった光源で行なっており、それに起因する系統誤差も含まれている。

(3) 相対分光応答度の比較結果

先に4.2.2, (4) および(5)で定義を示した総平均GMに対する、幹事機関値を含む全機関の比較値およびGMの標準偏差 σ を図4.7と表4.4に示す。

結果は次の通りである。

表 4. 1 SPD国内比較の測定条件

参加機関	A	B	C	D
標準受光器	可視：自己校正SPD 紫外：放射計（サーモパイル）	全域：P V D F 焦電形検出器 （金黒，窓なし）	全域：NIST（NBS）校正 SPD	全域：熱電対（放射計） 自己校正SPD
モノクロメータ	プリズム・回折格子 ダブルモノクロメータ	ニコン G 2 5 0 1,200本/mm, フレース 250nm	ニコン P 2 5 0 1,200本/mm, フレース 250nm	ニコン P 2 5 0 600本, フレース 300nm
使用光源	250nm~279nm D ₂ ランプ 280nm~800nm ハロゲン電球	1 全域：Xeランプ°（150W） 2 可視ハロゲン電球, UV Xeランプ°	全域：Xeランプ°（75W）	250nm~360nm Xeランプ° 360nm~800nm ハロゲン電球
チョッピング	なし	12.5Hz	なし	なし

表 4. 2 測定の安定性

機 関	安 定 性（±%）			
	400~ 800nm	315~ 400nm	280~ 315nm	250~ 280nm
B	0.04	0.11	0.08	0.17
C	0.18	0.40	0.32	1.82
D	0.05	0.08	0.07	0.18

表 4. 3 測定の再現性

機 関	再 現 性（±%）			
	400~ 800nm	315~ 400nm	280~ 315nm	250~ 280nm
B	0.38	0.50	0.18	0.46
C	0.11	0.24	0.31	0.34
D	0.07	0.21	0.34	0.73

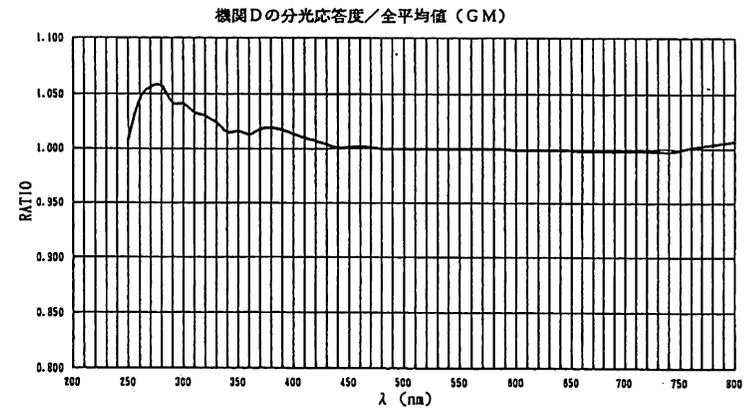
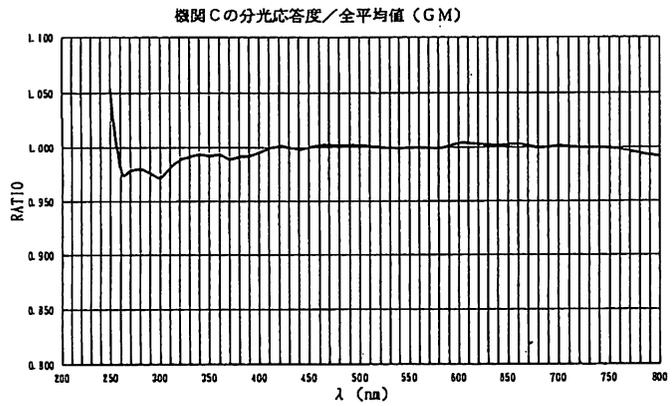
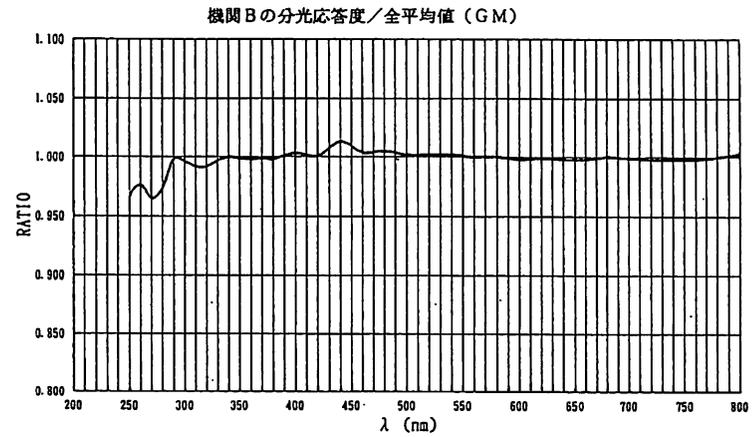
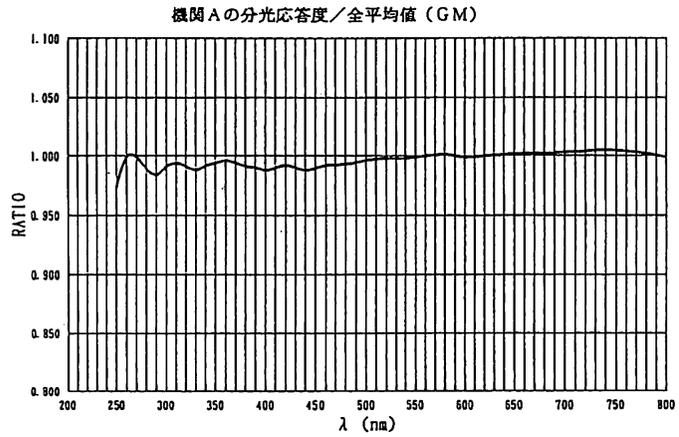


図 4. 7 分光応答度/全平均値

表 4. 4 相対分光応答度の比較結果

λ (nm)	機関 A	機関 B	機関 C	機関 D	偏 差
250	0.973	0.966	1.053	1.008	0.040
260	0.999	0.976	0.980	1.045	0.032
270	0.999	0.965	0.979	1.056	0.040
280	0.989	0.974	0.980	1.057	0.039
290	0.984	0.998	0.976	1.042	0.030
300	0.991	0.996	0.972	1.041	0.030
310	0.994	0.992	0.981	1.033	0.023
320	0.991	0.992	0.988	1.030	0.020
330	0.988	0.997	0.991	1.024	0.016
340	0.992	1.000	0.993	1.015	0.010
350	0.994	0.999	0.992	1.016	0.011
360	0.996	0.998	0.993	1.013	0.009
370	0.994	0.999	0.989	1.018	0.012
380	0.991	0.998	0.991	1.019	0.013
390	0.990	1.001	0.992	1.017	0.012
400	0.988	1.003	0.995	1.013	0.011
420	0.992	1.001	1.001	1.007	0.006
440	0.988	1.013	0.998	1.001	0.010
460	0.992	1.004	1.002	1.002	0.005
480	0.993	1.005	1.002	1.000	0.005
500	0.996	1.002	1.002	1.000	0.003
520	0.998	1.002	1.000	1.000	0.002
540	0.998	1.002	0.999	1.000	0.002
560	1.000	1.000	1.000	1.000	---
580	1.001	1.000	0.999	1.000	0.001
600	0.999	0.998	1.004	0.999	0.003
620	1.000	0.999	1.003	0.999	0.002
640	1.001	0.998	1.002	0.999	0.002
660	1.002	0.998	1.003	0.998	0.003
680	1.002	1.000	1.000	0.998	0.002
700	1.003	0.999	1.001	0.998	0.002
720	1.004	0.998	1.000	0.998	0.003
740	1.005	0.998	1.000	0.997	0.003
760	1.004	0.998	0.998	1.001	0.003
780	1.002	1.000	0.994	1.004	0.004
800	0.999	1.003	0.991	1.007	0.007

- (a) 400nm～800nm（可視域）での偏差は最も小さく、平均 0.4%、最大 1.1%である。
- (b) 315nm～400nm（UV-A域）での偏差は、平均 1.3%、最大 2.2%である。
- (c) 280nm～315nm（UV-B域）での偏差は、平均 3.1%、最大 3.9%である。
- (d) 250nm～280nm（UV-C域）での偏差は、平均 3.6%、最大 4.1%である。

以上の結果から、短波長域になるに従って偏差が大きくなることが分かる。この主な原因としては各機関が用いた標準検出器の分光応答度の固有差が考えられる。

上記した各波長域での偏差は現在の測定技術水準では実用的に許容し得る範囲と考えるとよく、4機関のいずれの値を用いても実用的には問題は生じないと思われる。

4. 3 分光応答度の絶対的な値

今回の測定は相対分光応答度について行なったものである。測定に参加した4機関は、過去に可視域で絶対応答度について比較測定を行なったことがあるので、その結果を今回の結果と重ね合わせることで、波長250nmから可視域にいたる波長範囲で絶対応答度を導くことが出来る。

- (1) 1989年に機関A, C, Dの間で自己校正法によって波長488nm, 633nmで行った。
- (2) 1988年に機関Bが相対分光応答度と分光放射照度標準及び全放射照度標準によって、値づけした試料を機関Cが自己校正法で校正した値と波長442nm, 488nm, 544nm, 633nmで比較して行った。

この2つの比較は完全に同じベースで行われたものではないが、機関Cの値を仲介として相互に比較することができる。その結果は表4.5の通りで、4機関の相互差は幅1.2%に入っている（標準偏差±0.6%）。

相対分光応答度の測定と絶対応答度の測定は相互に独立した測定であるから、この組み合わせによって、得られる絶対分光応答度の不確かさは、それぞれの不確かさの二乗和の平方根とみなすことができる。この値は、可視域で±1%以下、250nm～280nm域で±4%以下である。

4. 4 受光器による放射標準の動向

現在、NIST（米国）をはじめNPL（英）、PTB（独）など各国の国立研究所での放射測定の1次標準は極低温放射計を基準としている。我が国でも電子技術総合研究所が1994年から極低温放射計標準による放射測定の研究に着手した。

また、トレーサビリティ用やWorking Standard用として、シリコンフォトダイオード、およびトラップ型シリコンフォトダイオードが研究評価され、実用化されている¹⁾。

トラップ型とは、図4.8の様にシリコンフォトダイオードを3個～4個組み合わせてシリコンの表面反射をほとんど吸収してしまう原理に基づいており、シリコンフォトダイオードの自己校正法から開発されたものである。しかし、すべてのシリコンフォトダイオ

表4. 5 分光応答度の比較結果

機 関	488nm	633nm
A	0.9997	0.9997
B	--	1.0018
C	0.9964	0.9986
D	1.0039	1.0111
ばらつき幅 標準偏差	1.2 (%) ± 0.6 (%)	

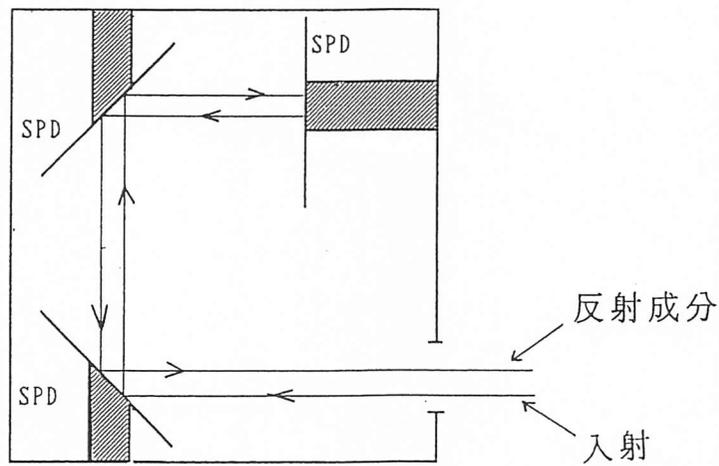


図4. 8 トラップ型シリコンフォトダイオードの構造（3個組合せ）の例

ードについて、この原理が成立するとは限らず、この用途に適した高品質なシリコンフォトダイオードを選択しなければならない。

また、最近では視野角 (Field of View) を大きくした、組み立てやすい、変化の心配のないなどの種々の構造のトラップ型ディテクターが検討されている。

(須山恵司 浜松ホトニクス㈱)

参 考 文 献

- (1) Metrologia 30-4, Oct. (1993)
- (2) Fujii, Y. et al: Japan International Electronic Manufacturing Technology Symposium WC2-5 (1993)
- (3) FuLei, J. Fischen: Metrologia 30 297 (1993)
- (4) 中川 他: 照明学会誌 77-10, 658 (1993)

5. 分光分布と分光応答度測定の具体的な手法

5.1 分光分布の測定

5.1.1 測定に必要な機材

放射源の分光分布（分光放射照度）を測定するために必要な機材は次のとおりである。

- (1) 分光装置 ; 回折格子形モノクロメータが一般的
- (2) 受光系 ; 光電子増倍管 (PM) と PM 用電源、及び PM 用ハウジング、光電流の検出・増幅装置
- (3) 入射系 ; 拡散入射面と入射用レンズなど
- (4) 放射源設定装置 ; 放射源 (標準, 試料) をセットするための光学ベンチ (放射源の距離測定ができる台), ランプハウス, 点灯用の電源 (安定化電源であること)
- (5) その他の付属装置 ; データ処理, 機器操作のためのコンピュータ, 各種の光学フィルタなど

この内で(1), (2), (3)は市販の既製品がそのまま使用できるが、(4)の入射系は分光装置に適合するように設定して製作する必要がある。(5)は機材・目的(対象物)に応じた選択が必要である。以下これらの機材を用いて、分光放射照度標準ハロゲン電球(以下、標準と記す)によって、電球、HIDランプ等の試料放射源の分光分布を測定する方法を述べる。

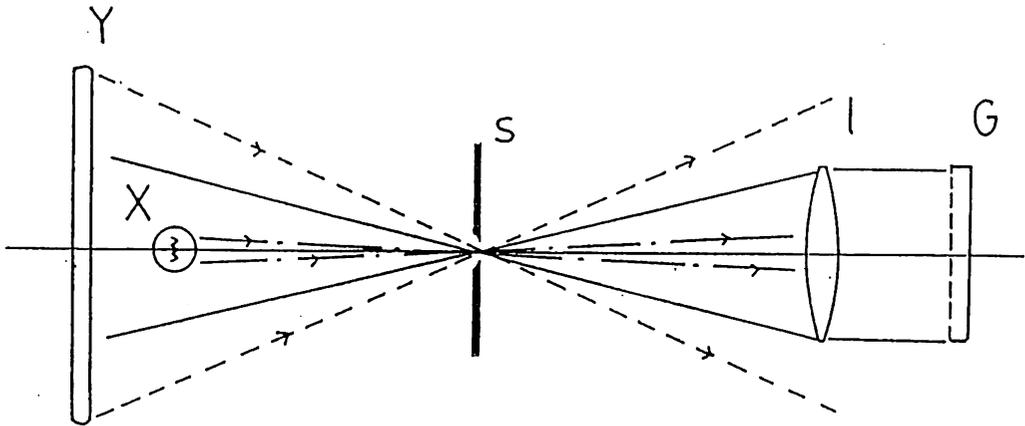
5.1.2 入射光学系

分光放射照度の測定を行うときは、放射源からの入射を一旦拡散面(反射又は透過形)で受けて、拡散面から反射(又は透過)した二次光をモノクロメータへ導く。このための装置を入射光学系とよぶ。

モノクロメータは、せまいスリットから光を採り入れる装置であるため、放射源がある程度大きいものであると、放射源の端から発光した光は、スリットでけられて内部に入らなくなるし、また点光源のようなものでは内部の一点にしか光が当たらない。モノクロメータの内部の光学素子や受光器(とくにPM)は受光面の特性のむらがかなり大きいので、同じ強さの光が入ったとしても、部分的にしか光が当たらない場合と全体に当たった場合では、出力に差が生じてしまう。(図5.1)

拡散面はこのような不都合を解消する目的で使用するものである。拡散面は硫酸バリウムやPTFE粉末(HalonのG-80粉末など)を圧縮成形したものを反射面として使用するか、透明石英板を100~150メッシュ程度のカーボランダムで砂ざりしたものを透過面として使用する。拡散面の特性としては反射面の方が透過面よりもはるかに秀れているが、取扱や保守の点では透過面の方が実用性が高い。ここではa)使用波長は250nmから、b)入射角5°以内(長さ10cmの光源なら60cm以上離す)で使用する制限条件を前提として石英砂ざり透過板入射系の設定方法を述べる(拡散反射面を用いる場合の詳細は文献1)参照)。

拡散板はモノクロメータの入射スリットの前に置く、入射スリットまでの距離Lと拡散



- Y, X : 放射源
- S : モノクロメータのスリット
- l : モノクロメータのコリメータ (レンズ)
- G : モノクロメータの分散系 (回折格子など)

図 5.1 モノクロメータの入射角特性

板の大きさ（縦方向 D_h 、横方向 D_w ）の関係は次式のとおりである。但し、拡散板とスリットの間には、後述する二次光カット用フィルタなどを入れる必要があるので L は少なくとも 100mm 以上とする。

$$D_w \geq \frac{L}{f} \cdot D_g \quad (5.1)$$

$$D_h \geq D_g + \alpha \quad (5.2)$$

ここで f はモノクロメータの焦点距離、 D_g は回折格子の大きさ、 h はスリットの高さである。 α はスリット高さに対する付加量でモノクロメータの内部光学系の配置によって異なるが、だいたい $h/2$ から h の間と考えてよい。例えば $f:250\text{mm}$ 、 $D_g:50 \times 50\text{mm}$ 、 $h:20\text{mm}$ なら、 $L=100\text{mm}$ のとき $D_w \geq 20\text{mm}$ 、 $D_h \geq 40\text{mm}$ となる。

測定を行うときの距離の原点は拡散面の砂ずりした面である。なお拡散面は試料放射源以外からの入射が当たらないようにフード等で遮光する。

5.1.3 標準と試料の配置

測定する放射源はその中心（光中心）が、測定系の光軸（拡散板の中心をとおり、面に直角な線）に一致するように上下左右の位置を調整して設置する。この際に測定する方向（向き）を正しく決めておかないと、再び点灯したときの再現性がなくなる。また前後の倒れがないように注意する。測定距離は前述のとおり入射角が 5° 以内となるようにする。測定距離は拡散面と光源の基準面（定められていないときは中心）の間の長さとする。

点灯はあらかじめ定められた条件で行い、点灯後は電球では $2 \sim 5$ 分、H I D ランプでは $10 \sim 15$ 分の安定時間をおいて測定に入る。

5.1.4 波長セッティング²⁾

測定する最も重要な波長域の中心附近の波長でモノクロメータの帯域幅（スリット波長幅） $\Delta\lambda$ が 5nm になるようにして、分光測定は波長間隔も 5nm として測定を行う。したがって波長 250nm から 500nm まで測定する際の測定点数は 51 点である。測定中はスリット幅（機械幅）は動かさない。分光測定は帯域幅と波長間隔を等しくした状態で行うのが理想的であり、この操作はそれにもとづくものである。現実にはモノクロメータのスリット機械幅を固定したときの帯域幅は波長によって多少変化するが、ニコン G 250 や日本分光 C T - 25 のようなツェルニターナ形のモノクロメータでは、その変化の程度は有効波長域内で数%以下である。

5.1.5 測定の手順³⁾

分光放射測定は標準と試料との比較測定である。その比較の方法は通常次の 2 通りである。

(1) 標準と試料を同時に点灯して、波長ごとに直接比較をする。

(2) 標準、試料を 1 本ずつ点灯して個別に波長走査して、そのデータを比較する。

(1) は精密測定でよくとられ直接比較であるため信頼性は高いが、光路の切換装置が必要

であるし、時間もかかる。(2)は簡便であるが、測定中に装置の状態が変動すると(例えば温度変化や疲労によって)、誤差が大きくなる。しかし、一般的には(2)がとられることが多いので(2)のシーケンスを説明する。標準(Std)で n 個の試料(X_1, \dots, X_n)を測定するときは、その順番は $X_1, \dots, X_1, \text{Std}, X_1, \dots, X_n$ のように一連の測定のはぼ中央で標準の測定を行うようにし、標準を最初に測ることはさける。これは、最初の測定は、測定系とくにPMの応答がなじんでいないために、精度が悪くなることがあるため、もし、標準に関するデータが不相当であると、すべての試料が影響されるからである。この意味で、最初の試料を測るときは、点灯待機時間を利用して、1回波長走査を行ってチェックしておく(慣らし測定)。なお、ワーキングスタンダード等を使用する目的で試料を測定するときは、更に折り返し測定(往復測定)、 $X_n, \dots, X_1, \text{Std}, \dots, X_1$ を行って、2測定の平均をとる。測定試料の個数 n は通常5以下とする。

5. 1. 6 迷光の補正とダイナミックレンジ

(1) 迷光の補正

標準に用いるハロゲン電球の放射の強さは、紫外の波長250nmでは波長500nmでの強さの $1/500 \sim 1/1000$ に低下する。また、モノクロメータの効率やPMの分光応答度も紫外域では低下するので、総合した装置の出力は250nmで500nmの $1/10,000$ 位なることは珍しくない。したがって紫外域の測定に際して、可視光のごく一部がなんらかの原因で入り込むと、そのために無視できない誤差が生ずる。これは迷光誤差とよばれる。分光装置の内部は反射を防ぐように黒く塗装してはいるが、それでも外部からの光が散乱して迷光となる。通常の装置では十分に調整を行っても、電球光の波長250nmでの測定に際して数%の迷光はさけられないので補正が必要である。この補正は次のように行う。

(a) 電球を点灯して、分光装置の波長ダイヤルを波長200nm以下(例えば180nm)にセットし、光路を開閉して出力をみる。このときの出力成分 I_0 が迷光である。

(b) 波長ダイヤルを250nmとして光路を開閉して出力 I_1 を得る、 $I_1' = I_1 - I_0$ が真の入射成分である。

この補正は $I_1'/I_0 \approx 200$ 程度になる波長まで行う。

Xeランプのような紫外に強い放射のある放射源では迷光はほとんど無視することができる。

(2) ダイナミックレンジ

前述のように分光測定の実出力(PMの光電流)は、紫外から可視域に亘る波長域で光入力で $1 \sim 10^3$ 以上も変動する。このような広範囲の入射に対して、入射と比例した出力を得ることはPMの特性上からも無理があるので、普通は波長域を区切って光路(入射スリットと拡散面の間がよい)に適当な光学フィルタ等の減光器を入れて、入射の変動が最大でも $1 \sim 30$ 程度になるようにする。なお、回折格子の分光器には2次光カット(波長目盛の $1/2$ の波長の成分が入ることを遮断する)が必要なので、減光と2次光カットを兼用

するのがよい。この減光フィルタとそのときの出力光電流の例を表5.1, 図5.2に示す。フィルタはロータリーディスク等に取り付けて波長に応じて光路に入るようにするのがよい。

5.2 分光応答度の測定

5.2.1 測定に必要な機材

放射検出器の分光応答度(相対値)を測定するために必要な機材は次のとおりである。

- (1) 分光装置 ; 回折格子モノクロメータが一般的
- (2) 入射用光源 ; ハロゲン電球(JC形, 近紫外~可視域), Xeランプ(75~150W, 紫外域), 重水素ランプ(25~200W, 紫外域)及びこれらのランプハウスと点灯装置。ハロゲン電球は安定化電源が必要。
- (3) 入射系及び出射系 ; レンズ及びミラー
- (4) 標準及び試料セッティング装置; 試料をセットするセル、及び位置合せ用のXYZステージ、及びこれらを遮光するためのハウジング
- (5) 光電流用増幅器
- (6) その他付属装置 ; データ処理, 機器操作のためのコンピュータ, 各種の光学フィルタなど

これらの内(1), (2), (5)は市販の既製品がそのまま使用できるが(3)の入射系と出射系は分光装置にあわせて製作する必要がある、(4)も同様である。

5.2.2 入射および出射光学系とその調整⁶⁾

分光応答度測定の入射および出射光学系は放射源からの光を集光してできるだけ均斉度のよい(照射面内の照度むらの少ない)単色光を作って試料面に当てる機能をもたなくていけない。このための入射系としては色収差と像の歪を少なくするために口径の大きい凹面ミラーを用いるのが最も望ましい。しがし、ミラー系の光軸の調整はかなりの経験を要するし、保守にも問題があるので、ここでは a) 使用波長は250nm まで、b) 標準検出器にはシリコンフォトダイオードをもちいる(熱形検出器は用いない)、とした制限条件付でレンズと拡散面を用いた入射・出射系を使用する方法について述べる。

入射用には集光レンズと視野レンズを用いる。集光レンズは焦点距離 f_1 : 50~60mm, 口径 d 30~40 ϕ の合成石英製両凸レンズを用いる。レンズは入射スリットの前面約 $2f_1$ の位置に置く、レンズは適当なセル(金枠)に入れて、XYZステージに取付けて上下、左右、前後が微動できるようにする。入射用放射源は集光レンズの前方約 $2f_1$ の位置に置き、これもXYZステージ上に置く。視野レンズは焦点距離が $2f_1$ に等しく、口径はスリット高さよりやや大きい程度の合成石英製両凸又は平凸レンズを用い、入射スリットの直前に固定する。(図5.3)

出射側は視野レンズと拡散面を配置する。視野レンズは焦点距離 f_2 : 50~70mm、口径はスリット高さよりやや大きい程度の合成石英製両凸または平凸レンズで、出射スリット直後に固定する。拡散板は合成石英板を100~150メッシュで砂ずりしたもので、口径は

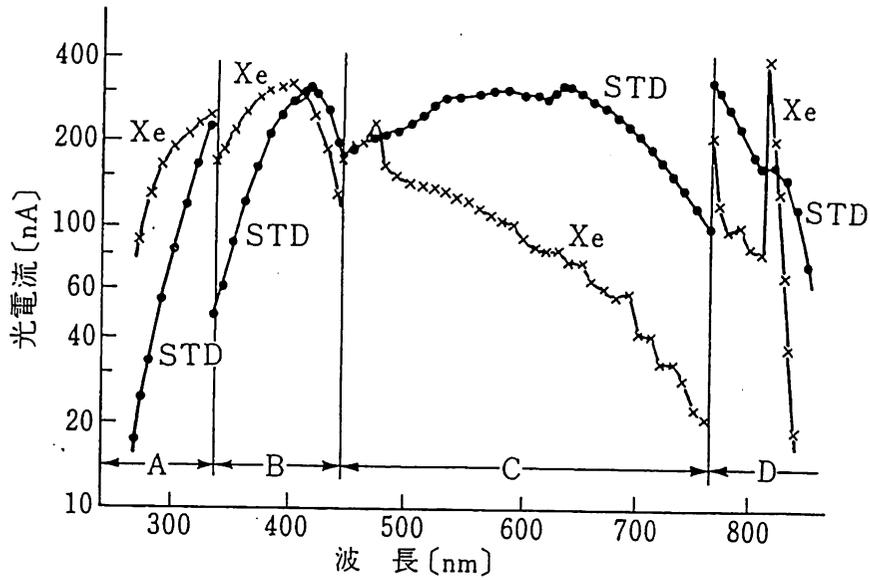


図 5.2 波長域ごとにフィルタで調整した光出力電流の例

表 5.1 波長域によるフィルタの組み合わせの例

波長区分 [nm]		フィルタ	減光フィルタ
A	270 ~ 330	UG - 11	10 % (Xe のみ)
B	335 ~ 440	B - 44	30 % + 30 % (Xe のみ)
C	445 ~ 760	Y - 42	10 %
D	765 ~ 850	R - 62	30 %

減光フィルタはメッシュスクリーン形

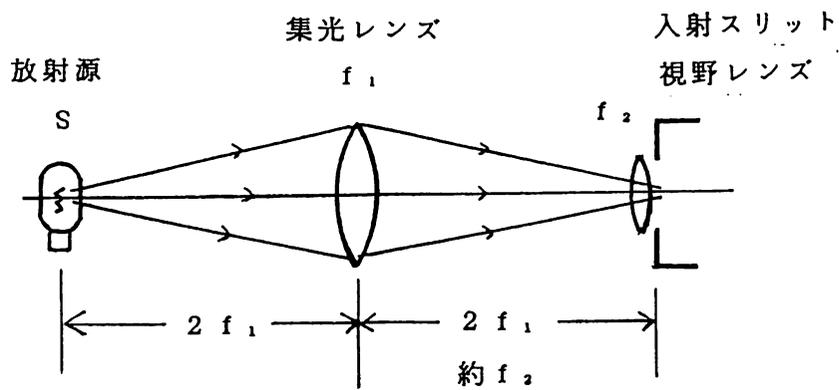


図5.3 分光応答度測定の入射光学系

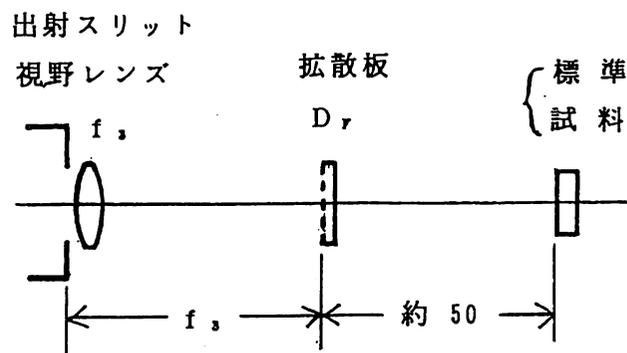


図5.4 分光応答度測定の出射光学系

25~30φとし出射スリット後方約 f_2 の位置に固定する。測定する試料は拡散板の後方50~70mmの位置に置く。(図5.4)

放射源からの入射は、集光レンズによって放射源の像が入射スリット面上に結像するように調節する。このとき、レンズと放射源の中心がモノクロメータの光軸に一致していなければならない。モノクロメータの波長を0nm又は約540nmにすると出射側の拡散面上に白色又は緑色の矩形の光像(回折格子の像)が投影されるので、この像が鮮明かつ均一になるように放射源とレンズの位置を微調整する。

5.2.3 波長セッティング

この操作は5.1.3で述べた分光分布測定に準じて行うが、一般に放射検出器の分光応答特性はHIDランプの分光分布などよりも起伏が少ないので、帯域幅 $\Delta\lambda$ は3~7nmの範囲、波長間隔も5又は10nmにとってよい。但し、シリコンフォトダイオードは紫外域で細かな凹凸があるので $\Delta\lambda$ と、波長間隔を5nmにそろえる。

5.2.4 標準と試料のセッティングと測定のシーケンス

標準と試料は受光面積が同じであれば拡散板から同じ距離の位置に置く(口径5~10mmであれば50~70mmはなす)。試料の口径が大きいときは口径に比例して距離をはなすようにする。測定のシーケンスは5.1.5と同様にする。

5.2.5 迷光の補正とダイナミックレンジ

これに関しても5.1.6と同様な注意を払えばよい。

5.3 測定値の処理

標準につけられている分光分布又は分光応答度の値を $S(\lambda)$ 、測定によって得られた標準及び試料からの出力電流を $I_s(\lambda)$ 、 $I_x(\lambda)$ とすると、試料の分光分布又は分光応答度 $X(\lambda)$ は次式から求められる。

$$X(\lambda) = S(\lambda) \frac{I_x(\lambda)}{I_s(\lambda)} \quad (5.3)$$

分光分布測定で標準と試料の距離(それぞれの光中心から測定面までの距離)が同じでなくて、それぞれ l_s 、 l_x であれば、上の値に $(l_s/l_x)^2$ を乗ずる。但し、光源の最大長が距離の1/10以下でないとの関係は成立しない。

(中川靖夫・埼玉大学)

参考文献

- (1) 照明学会編：光の計測マニュアル P102 (1990) 日本理工出版会
- (2) 同上 P289
- (3) 同上 P302, P331
- (4) 同上 P333
- (5) 中川他：照明学会誌 77-10, 658 (1993)

6. その他

6. 1 365 nm放射の値付けについて

6. 1. 1 放射源の選定

光化学反応などの放射測定や近紫外用の放射照度計の校正などの目的には水銀放電の365nm放射が使用される。この放射は高圧または超高圧水銀ランプとUV-D36B, U-360などの色ガラスフィルタを組み合わせることで取出すことができる。高圧水銀ランプとしては透明バルブのH200~H400などの一般照明用のもの、あるいは後述するクレフト水銀ランプが使用できる。超高圧水銀ランプとしてはSHL-100-UVなどが適している。蛍光水銀ランプは不適當である。

高圧水銀ランプの主要な放射(線スペクトル)300~500nm域には303, 313, 334, 365, 405, 408, 436nmの各ラインがあり、前述のフィルタを用いると365nm放射以外の放射はかなりカットできるが、クレフト水銀ランプやSHL-100-UVは短波長側の放射が強いので、さらにUV-33, UV-34などのシャープカットフィルタを重ねて用いるとよい。これらのフィルタは温度上昇で透過率が変化するのでランプからは十分離して用いるのがよい。ランプは適當なランプハウスに入れて点灯する。クレフト水銀ランプやSHL-100-UVは320nm以下の有害紫外放射の強度が強いので、直射が人体などに当たらないよう十分な注意が必要である。ランプの枯化は、それぞれのランプの定格寿命時間の10%程度で実施する。安定性、再現性の基準はXeランプと同様にとる。

6. 1. 2 365 nm放射照度の値付け

(1) 受光器標準による方法

2. の殺菌ランプの場合と全く同様の手順で行えばよい。受光器に用いるフィルタは色ガラスフィルタよりも干渉フィルタがよい。

(2) 分光放射照度標準電球による値付け

5. に述べたような測定系でモノクロメータのスリット波長幅を約5nmにとって、まず365nmで標準電球の入射を測定する。次に365nm放射を値付けするランプ(フィルタ併用)からの放射を波長355nmから375nmまで1nmごとに測定して、その総和を求める。この手続きで標準電球の365nmの放射照度を S_{365} 、標準電球の365nmにおける出力の読みを I_s 、試料ランプの出力の読みの総和を $\sum I_x$ とする。試料ランプの365nm放射照度 E_{365} は次式で求められる。

$$E_{365} = S_{365} \cdot \frac{\sum I_x}{I_s} \quad (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$$

なお、この測定では通常、水銀ランプの365nm放射照度は電球の10~100倍に達するので、水銀ランプ測定するとき光路にニュートラルフィルタを入れるか、距離を十分大きくとるなどの処置が必要である。なお、高圧水銀ランプは365nmライン放射の前後に弱い連続放射があるが、通常は無視できるレベルである(フィルタ組み合わせのと

き)。超高圧水銀ランプでは、連続部が強くなるので、SHL-100-UV のときは連続部についても測定しておく方がよい。

6. 1. 3 クレフト水銀ランプ^{1) 2)}

このランプは図6.1 に示すような入力約250W の特殊な高圧水銀ランプであって、管電圧、管寸法を十分正確に保てば、一定した分光分布の放射が得られる。点灯は直流であり、専用の安定器で点灯する。相対分光分布の値を表6.1 に示すが、測定者、試料が異なっても紫外域でよい一致が得られていることが分る。したがって365nm 放射の放射照度が付けられれば線スペクトル放射の校正用放射源として利用できる。このランプはOSRAM社やPhilips 社が供給していたが現在では生産を中止している。国内では(株)オーク製作所で同等品(図6.2)を生産しているのので、照会してみるとよい(同社HHL-250/A-OM-ST)。

6. 2 185nm放射の値付け

6. 2. 1 185nm測定のご概念

最近、半導体関連産業などで表面洗浄やリソグラフィ、あるいは光CVD(薄膜堆積)などの目的で波長185nmの放射や185nm放射によるオゾン発生などが広範囲に用いられている。

紫外放射は波長約200nmよりも短波長になると大気中の酸素による吸収を受けるようになり、190nm以下では吸収が急激に増加する。図6.3に通常の大気中での185nm放射(低圧水銀放電の185nmラインスペクトル)の吸収による減衰を示す³⁾。これから分るように吸収量は10cmの距離で50%以上に達する。また、この吸収によってオゾンが発生するが、オゾンは更に長い波長の放射も吸収して、254nm放射もオゾンによってかなり吸収される。

図6.4にオゾンによる吸収を示す⁴⁾。

以上のような事情から185nm放射を安定に測定するためには酸素のない状態で行う必要がある。このためには a)真空中で行う b)窒素雰囲気中で行うかのいずれかによらなければならない。真空にする場合の真空度は測定距離が30~40cmであれば、1 torr程度で十分である。窒素雰囲気を作る場合は、ベルジャーのような気密容器を一旦、真空引きしてから窒素を導入するのがよいが、大気圧のままでも容器の容積の20~50倍の窒素をフローすれば、ほぼ完全な窒素雰囲気が作れる。なお、窒素は封じ切りでなくわずかにフローする(5 l/min位)のよい。

6. 2. 2 放射源の選定

185nm放射を値付けするランプは、合成石英管の低圧水銀ランプが適している。その一例を図6.5に示す(コスモ技研 CLH15SD)。放電ランプとしての特性は殺菌ランプと同等と考えてよく、安定器もGL-15用が使用できる。常温で水平点灯した状態でのこのランプの185nm放射照度は、真空中または窒素雰囲気中で測定したとき、管電流0.3Aで管中央部50mmの部分にアパーチャでとりだすようにして、125mm離れて約90μW・

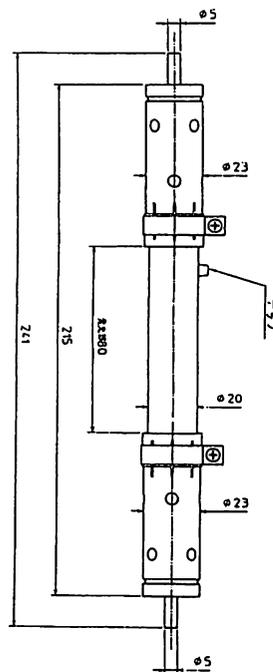
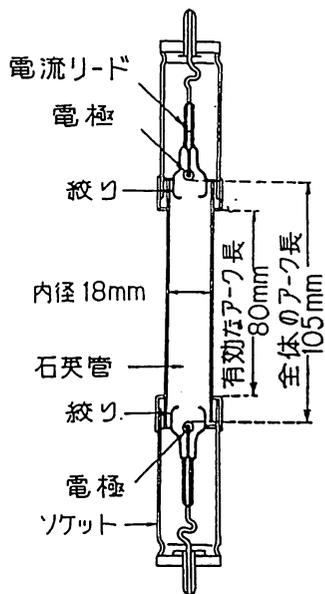


図 6.1 クレフトの水銀ランプ

図 6.2 オーク製クレフト形水銀ランプ

表 6.1 クレフト水銀ランプの分光分布

線スペクトルの相対放射強度の測定値
(365.0/6.3 nm の線スペクトル群の放射強度を 100 とする)

測定者 波長 (nm)	和光電気製		Osram 製				鈴木測定の 平均値
	鈴木	鈴木	中川*	Kok	Dejardin	Osram 推奨値	
577.0/9.1	69.5	69.1	69.1	72.1	76.8	76.2	69.4
546.1	82.0	82.4	81.9	80.1	87.6	85.3	82.1
435.8	69.5	69.1	68.9	67.0	71.0	71.0	69.4
404.7/7.8	42.5	41.7	42.3	43.0	42.8	42.6	42.3
365.0/6.3	100	100	100	100	100	100	100
334.1	7.6	7.7	7.6	8.5	8.1	7.2	7.6
312.6/3.2	64.5	64.1	65.7	67.8	65.8	62.5	64.4
302.2/2.7	28.7	28.4	28.7	27.7	28.5	27.6	28.6
296.7	16.4	16.5	16.6	16.8	16.0	16.0	16.4
292.5	1.7	1.6	1.6	—	—	—	1.7
289.4	6.0	6.0	6.0	—	5.6	5.8	6.0
279.9/80.4	11.0	11.0	11.0	—	11.5	11.1	11.0
275.2/5.9	3.7	3.6	3.6	—	3.8	3.6	3.7
269.9/70.0	4.2	4.2	4.4	—	5.0	4.6	4.2
264.0/5.4	22.8	22.9	23.0	—	23.9	24.5	22.8
測定距離	1.5 m	1.5 m	1.2 m	1 m			1.5 m
測定標準	電総研分光 放射照度標準	電総研分光 放射照度標準	電総研標準 **	NBS 標準	水素ランプ、 標準の光 A	リボン電球	電総研分光放 射照度標準

* 中川のスペクトル評価法では、あらかじめ設定した、輝線をはさむ 2 波長間を (分光器の波長ドラムを同期モータで回転して) 連続的に掃引し、モータ回転の間だけ積分形のデジタルボルツメータのゲートが開くような装置によって (時間×電圧) のデジタル表示を求め、さらに、ドラム目盛と線分散とから (波長×電圧) に計算し直して、いわゆるプロフィールの面積を求めている。

** 電総研の分布温度目盛と、電総研分光放射照度標準電球の相対分光分布 (黒体放射との比の形で表した) とを利用した。

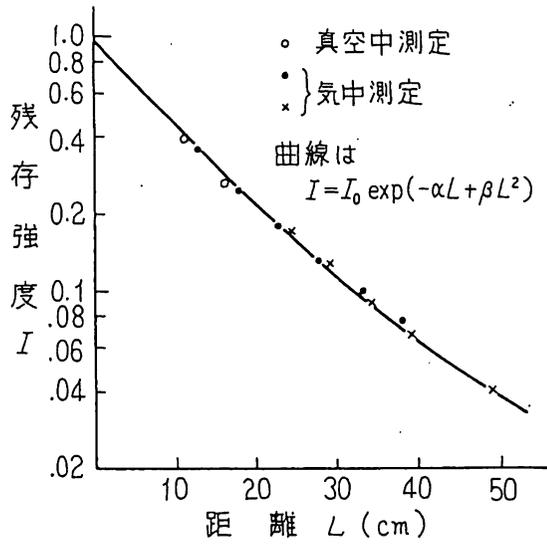


図6.3 185 nm放射の大気中の減衰特性

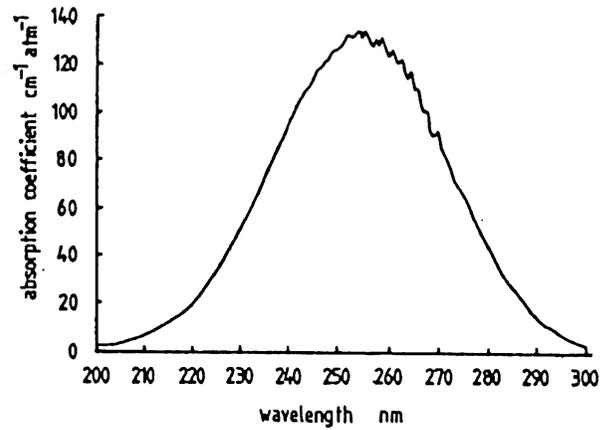
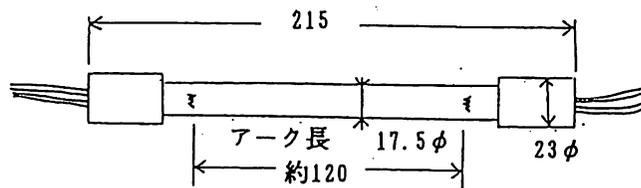


図6.4 オゾンの吸収スペクトル



管電流 $I_L = 0.3 \text{ A}$ 管電圧 約 33 V 安定器 GL-15用

図6.5 185 nm放射源低圧水銀ランプ

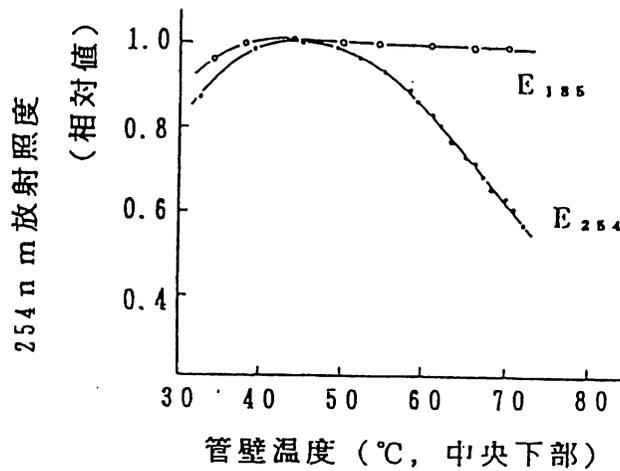


図6.6 ランプの管温度と185, 254 nm放射強度

cm^{-2} である。185nm 放射の254nm 放射に対する強度比は20~25%である。

185nm 放射は温度に対しては安定で図6.5のランプで管温度が40~70°Cでほとんど一定である。これに対して254nm 放射は温度によって大きく変動する(図6.6)⁵⁾。このランプを大気中で点灯すると185nm 放射によって発生したオゾンが管の囲りを鞘のようにとりまいて対流を起こすため、254nm 放射が吸収されて、254nm の放射照度が非常に不安定になる。したがってこのランプを254nm 放射校正用と兼用するのは止めた方がよい。ランプ選定の枯化時間は100h程度でよい。

6.2.3 185nm放射照度の値付け

185nm 放射照度の値付けを定常的に行っている公共機関や、メーカーはないが、研究的な目的や自家用として値を保持している機関があるので、値付けを相談してみるとよい。

値付けをする場合には、もともになる校正源は254nm 放射と同様に放射検出器とするのがよい。シリコンフォトダイオードは石英窓付きのものの分光応答度が、波長180nm位までかなり高いレベルを保っている(560nmでの応答度を1としたとき0.3~0.4位)ので、これに185nm用の帯域フィルタを組み合わせ使用する。帯域フィルタとしてはアメリカACTON社185HRなどがあり市販されている。185nmの透過率は同じフィルタを2個用意して、その内の1個を前述のランプと組み合わせ185nm放射を作り、それで他の1個の185nm透過率を測ればよい(分光光度計等で測定すると、吸収のために誤差が大きくなる)。このフィルタの185nm透過率は一般に20%程度でかなり低く、しかも裾がかなり広いので、254nm放射の混入が生じる。したがってシリコンフォトダイオードと組み合わせるときは、測定状態でまず254nmは透過して185nmはカットする遮断フィルタ(SCHOTT WG 230, 保谷UV-22など)を光路に入れて、254nm放射の混入レベルをチェックする。

シリコンフォトダイオードの185nmにおける応答度の値付けは前述のランプ同様、メーカー、公共機関に相談してみるとよい。

なお、シリコンフォトダイオードに185nm用フィルタを組み合わせたときの有効入射角は10~15°程度なので、放射源との位置関係には十分注意する。

6.3 重水素ランプ

6.3.1 重水素ランプの概要

重水素ランプは分光光度計や分析機器用の光源として広く用いられている熱陰極形の放電ランプで、20~200Wの種々のものがある。代表的な品種としては浜松ホトニクスL1626, L1636などがある(図6.7)。点灯には専用の電源装置が必要である。

重水素ランプの分光分布は、タングステン電球の分光分布とは反対に紫外域の長波長側から短波長側へ向かって増大する連続スペクトルである。これをタングステン電球と併用する場合は300nm前後で切り替え使用することが多い。分光分布の一例を図6.8に示す。重水素ランプの放射は電極板の小穴(1φ位のことが多い)からの発光を径15φ程度の窓(合成石英)からとり出すため、指向性が非常に強い。

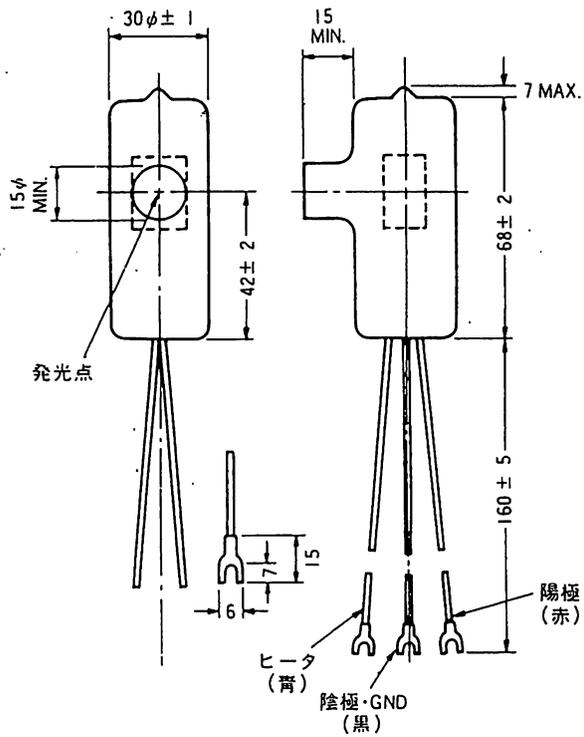


図6.7 重水素ランプの外形

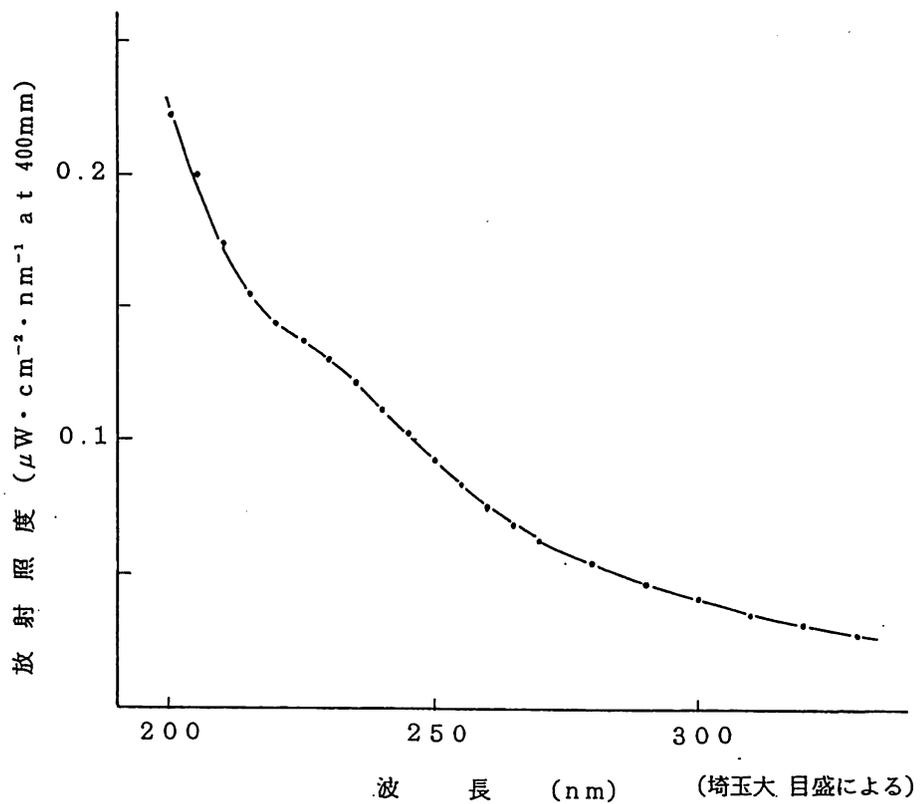


図6.8 重水素ランプ L1626 の分光分布の例

6.3.2 重水素ランプの分光分布

重水素ランプを短波長紫外域での分光放射照度標準として用いようとする試みは以前からなされていて、国内でも埼玉大⁶⁾電総研⁷⁾で値付けが行われたが、共に研究室段階に留まっている。一方、アメリカのNBS（国立標準局、現在のNIST）で1977年に値付けした目盛にもとづく標準重水素ランプ（ランプは浜松ホトニクス製）がアメリカのOPTRONIC LAB.社から発売され、かなりの数が輸入されている。しかし、個体差がかなり大きく、標準としては疑問がある。また、同じNBSで1987年に値付けした標準も発表されている⁸⁾。図6.9はこれらの相互比較結果で、国内の埼玉大値を1.00とした比較値を示す。埼玉大値とNBS 1987年値（RB0387）はよく一致しているが、NBS 1977/OPTRONIC 値（NO. 497, 636）はかなり大きく異なっている。

6.3.3 重水素ランプの点灯特性

（1）指向特性（配光）

図6.10に重水素ランプL1626の水平方向の指向特性の一例を示す。図から分るように指向性は非常に鋭く、光軸から 1° 以上外れると放射強度は約 $5\%/deg$ の割合で変化する。鉛直方向についてもほぼ同様の変化がある。したがってランプは必ず適当な治具に固定し、水平面と鉛直面の方位誤差が 0.5° 以下になるようにしないと、再現性が維持できない。このことは重水素ランプ使用に際して最も重要なことである。

（2）安定性

重水素ランプの安定性は一般的に良好で、再点灯の再現性が 1% に入るものが容易に得られる。安定性は短波長放射の方がよく、 300nm よりも長い波長の方が安定性が悪い。しかし、点灯をくり返す過程で、突発的に放射強度が数%変動することがあるので複数本を組にして使用する必要がある⁹⁾。周囲温度の変化に対しては室温附近でほぼ安定であるが、真空中で点灯すると放熱が不十分になり、分光分布がかなり変化する。一旦このようになると大気中で再点灯しても以前の状態に復帰しないので、値付けしてあるランプを真空中で点灯することは避けた方がよい¹⁰⁾。

（3）経時特性

重水素ランプL1626を、第3章で述べたXeランプの経時測定と同様に、点滅1時間毎の100時間点灯した結果の一例を表6.2に示す（枯化20h後）。100hでの変化は $2\sim 5\%$ で、 300nm 以上の長波長側の方が変化が大きい。なお、点灯初期に石英窓の透過率低下（ソラリゼーション）が起こるので⁸⁾、10h以上の枯化を必ず実施する。

（中川靖夫，大谷文雄・埼玉大学）

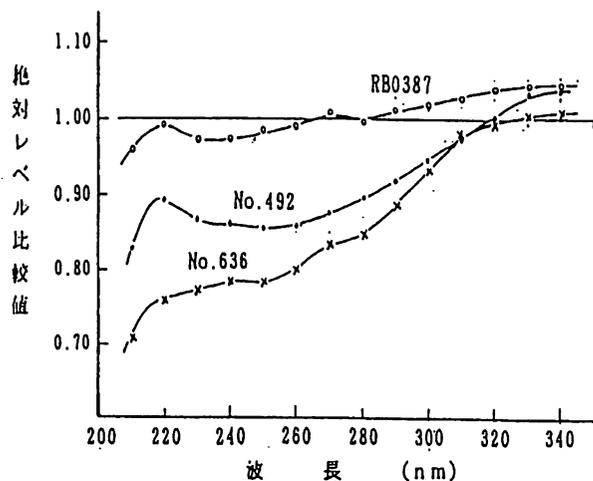


図 6.9 重水素ランプ放射標準の相互比較

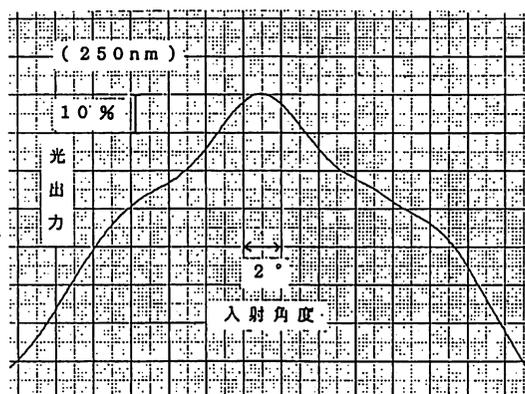


図 6.10 重水素ランプ L1626 の水平配光特性の例 (250nm)

表 6.2 重水素ランプ L1626 の波長ごとの経時変化 (100h, 100点減)

時間 (h)	N O. 9 7 2					
	200 nm	225 nm	250 nm	275 nm	300 nm	350 nm
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	1.014	1.007	1.000	0.996	0.993	0.980
20	1.007	1.009	1.001	0.997	0.998	0.986
30	0.997	0.996	0.990	0.990	0.989	0.981
50	1.003	1.010	0.999	0.992	0.994	0.985
75	0.996	1.001	0.992	0.984	0.978	0.973
100	0.986	0.987	0.976	0.976	0.971	0.966

時間 (h)	N O. 9 7 5					
	200 nm	225 nm	250 nm	275 nm	300 nm	350 nm
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.996	1.011	1.013	1.009	0.997	0.985
20	0.986	0.998	0.996	0.991	0.981	0.966
30	0.982	0.998	1.000	0.993	0.982	0.972
50	1.008	1.028	1.012	0.999	0.987	0.978
75	0.969	1.002	0.995	0.983	0.964	0.953
100	0.955	0.983	0.973	0.974	0.957	0.944

参 考 文 献

- (1) H.Kreffft et. al:Z.Tech.Physik, 18 (1937), 20
- (2) 鈴木守他：電総研研報 No.742 (1973), P64
- (3) 中川ほか：照学誌 72-6, 319 (1987)
- (4) R.Phillips : Sources & Applications of Ultraviolet Radiation p408, (1983),
Academic Press
- (5) 中川ほか：平成4年照学会全国大会 126 (1992)
- (6) 中川, 大谷：照学誌 59-10, 462 (1975)
- (7) 長坂ほか：昭和51年照学会東京支部大会 25 (1976)
- (8) NBS Specials Pub. 250-20 (1987-9)
- (9) 中川ほか：平成4年照学会東京支部大会 41 (1992)
- (10) 安田ほか：平成5年照学会全国大会 13 (1993)

JIEG-007 a,bセット	「a.紫外放射の産業界における使用例と その実用測定機器・方法の現状 b.紫外放射の標準と校正技術」
税込価格	¥4860 4,950
会員価格	¥3645 3,712