

JIER-011

せん光の測光方法研究調査委員会報告

昭和63年3月

社団法人 照明学会

せん光の測光方法研究調査委員会

せん光の測光方法研究調査委員会報告書

目次および執筆者

1	まえがき (近藤)	1
1.1	報告書作成の目的と作成方針	1
1.2	物理量 (測光量) と心理 (物理) 量	2
1.2.1	ブロンデル・レイの式の有効性	2
1.2.2	明所視と暗所視	3
1.3	報告書の構成	3
2	被測定光源 (単発光型キセノン放電ランプ) の特性	6
2.1	キセノン放電管の基本的な形状と発光原理 (松倉)	6
2.1.1	キセノン放電管	6
2.1.2	放電管の形状	6
2.1.3	発光の基本	6
2.2	せん光の分光特性 (近藤)	8
2.3	せん光の時間的特性・周波数特性 (石井)	11
3	測定方法の種類と測定の原理	15
3.1	コンデンサ方法 (近藤)	15
3.2	波形解析方法 (村山)	16
4	測定装置	17
4.1	コンデンサ方法	17
4.1.1	光電素子 (岩田)	17
4.1.1-1	分類と種類	17
4.1.1-2	シリコンフォトダイオードと光電管の諸特性	19
4.1.1-3	暗電流 (雑音電流) と直線性	22
4.1.1-4	視感度補正方法の一例	24
4.1.2	電子回路 (石井)	37
4.1.2-1	非反転増幅器を用いる場合	37
4.1.2-2	積分回路を用いる場合	40
4.2	波形解析方法	45
4.2.1	光電素子 (岩田)	45
4.2.1-1	分類と種類	45
4.2.1-2	時間応答性	47
4.2.2	電子回路 (石井)	51
4.2.2-1	並列帰還方式	51
4.2.2-2	直列帰還方式	53
4.2.3	波形記録装置 (近藤)	57

5	測定方法 (齊藤)	58
5.1	測光器の目盛り校正	58
5.1.1	コンデンサ方法	59
5.1.2	波形解析方法	59
5.2	受光器の色補正係数	61
5.2.1	定常光 (光度標準電球) による測定	62
5.2.2	フラッシュ光による測定	62
5.3	測定・校正上の注意事項	63
5.4	市販のフラッシュメータを使用した測定	64
5.4.1	定常光によるメータ校正	64
5.4.2	フラッシュ光の測定	65
6	実測例 (村山)	72
6.1	測定装置	72
6.1.1	使用機器	72
6.2	測定例	73
7	せん光の測定を行っている公的機関名と測定内容 (近藤)	78
7.1	通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 (電総研)	78
7.1.1	測定内容	78
7.1.2	担当者	78
7.1.3	連絡先	78
7.1.4	費用	78
7.2	社団法人 日本船舶品質管理協会 船舶艤装品研究所 (艤装品研)	78
7.2.1	測定内容	78
7.2.2	担当者	78
7.2.3	連絡先	78
7.2.4	費用	78
7.3	財団法人 日本写真機光学機器検査協会 (日写検)	79
7.3.1	測定内容	79
7.3.2	担当者	79
7.3.3	連絡先	79
7.3.4	費用	79
8	関連規格・参考規格	80
8.1	SOLAS条約及び国内型式承認試験 (村山)	80
8.1.1	83年改正SOLAS条約第3章	80
8.1.2	型式試験項目	82
8.1.2-1	救命胴衣灯	82
8.1.2-2	自己点火灯	83

8.1.2-3	キャノピー灯	83
8.2	国際民間航空条約（松原）	85
8.2.1	飛行場で使用するせん光式灯火・障害物を示すせん光式灯火	85
8.2.1-1	滑走路において使用する灯火	85
8.2.1-2	飛行機に対する障害物を示す灯火	85
8.2.2	関連条約	85
8.2.2-1	進入路指示灯	85
8.2.2-2	滑走路末端識別灯	86
8.2.2-3	高光度航空障害灯	86
8.3	JIS規格（近藤）	88
8.3.1	JIS B 7093	88
8.3.2	JIS C 7611	88
8.4	ISO規格（近藤）	88
8.4.1	ISO 1229	88
8.4.2	ISO 2827	88
9.	参考文献（近藤）	89
10.	資料名（近藤）	91

1. まえがき

1.1 報告書作成の目的と作成方針

この報告書は、下記の委員によって構成された、社団法人照明学会の「せん光の測光方法研究調査委員会」が、昭和61年度および昭和62年度の2箇年にわたって行った研究・調査の成果をまとめたものである。

委員長	近藤英樹	財団法人	日本写真機光学機器検査協会
幹事	齊藤一朗	工業技術院	電子技術総合研究所
委員	石井弘允	日本大学理工学部	
	岩田茂美	浜松ホトニクス株式会社	
	松倉卓司	ウエスト電気株式会社	
	松原末明	日本船燈株式会社	
	村山雅己	社団法人	日本船舶品質管理協会 船舶艙装品研究所
	渡会吉昭	松下電子工業株式会社	

この委員会が設置された目的は、救難・障害信号に使用されているせん光（パルス光）の光度^{*}の時間積分値の測定方法を設定することにある。ところで、「せん光」というと、写真用のエレクトロニックフラッシュ（ストロボ）のように、光源（発光体）そのものが瞬時的な光を発すると考えがちだが、ここで問題にするせん光は、観察者の側からいっているのであって、光源そのものがせん光である必要性はない。したがって、せん光を実現するための光源系としては、次にあげるようにいろいろのものが考えられる。

- (1) 定常光をチョッパで断続するもの
- (2) 指向性をもつ定常光を、その光軸に直角な軸のまわりに回転させることによって、一定の方向から見た光が断続するようにしたもの
- (3) 定常光を電氣的に点滅するもの
- (4) 放電ランプ（群発光型および単発光型）
- (5) パルスレーザー光

この報告書には、原理的には、上記のすべてのせん光に適用できる測定方法が書いてある。しかし、パルスレーザー光のように極端にせん光時間が短い（ns～fs）場合には、測光回路の作製に特別の注意が必要になることと、パルスレーザー光が救難・障害信号に使われる可能性が非常に少ないことから、この報告書ではパルスレーザー光のことは考えないことにした。

主な対象としたのは、せん光時間が数十 μ sから数ms程度の単発光型キセノン放電ランプの光である。この理由は、現在、キセノン放電ランプが、せん光式の信号灯に主として

*） 光源のある方向の光の強さ。

使用されていることと、将来もそうであろうと考えたからである。

測定方法を設定する際には、次の各点に特に注意した。

- (1) 報告書を読めばだれでも測定ができるように、原理ではなくノウハウを書く。たとえば、測定回路も原理を示すのではなく、なるべく具体的に書き、原則として、回路図を見れば装置が組めるようにする。
- (2) 測定装置は、国・公立研究所などが、費用をあまり気にかけず、測定の正確さと精密さ（精度）に重点をおいて測定するときのためのものと、多少精度は低くても、メーカーなどが気楽に測定に使えるようなあまり高価でないものとの両方を示す。
- (3) 市販の測定器（写真用のフラッシュメータなど）で利用できるものの商品名と使用方法を記す。

さらに、測定の際に注意すべきこと、誤差要因の検討方法を記すことにより、報告書の実用価値を一層高めた。

この報告書はまた、救難・障害信号灯以外のせん光の測定を試みる人にも役にたつように、「余分な情報」を入れてある。例えば、測定回路は、せん光時間が数 μs から 100 ms 程度のせん光まで適用できるように考えてある。また、広くせん光一般の測定に関する規格、文献、資料などのリストをつけてある。さらに、せん光の測定を行っている公的な機関名とそこで行っている測定の内容、担当者名、大体の費用も記してある。

1.2 物理量（測光量）と心理（物理）量

1.2.1 ブロンデル・レイの式の有効性

この報告書に書いたのは、物理量（測光量）としての光度の測定方法である。しかし、救難灯のように人間の目で見える光を評価するときには、物理的な明るさと心理的な明るさとの対応を考えなければならない。この報告書で扱うようなせん光の場合には、物理量としての明るさの最大値は同じでも、光が持続する時間（せん光時間）の長短によって目に感じる明るさが変わることが報告されている。

それで、救難・障害信号灯の明るさなどを規定した SOLAS*1) 条約や、国際民間航空機関が発行した、飛行場に関する国際民間航空条約などでは、物理量としての光度ではなく、心理的な明るさを示す「実効光度」で救難・障害信号灯の明るさを規定している。

実効光度は、物理量としての光度をせん光時間について積分した値から、ブロンデル・レイ**1) の式によって求めることになっている。この報告書では、3 測定方法の種類と測定原理の(1)に求めかたを説明してある。

ブロンデル・レイの式は非常に有名で、せん光・パルス光の心理的な明るさを評価するときにはいつも引用され、使われる。しかし、この式を導く基になった実験は、せん光の

*) Safety Of Life At Sea の略称

**1) A. Blondel and J. Rey

明るさの時間的変化（光束／光度対時間特性；発光波形）が台形状の光について行われているので、その結果をそのまま、この報告書の対象になっているキセノン放電ランプの光に適用してよいかどうかは分からない。なぜなら、2 被測定光源（単発光型キセノン放電ランプ）の特性に示したように、キセノンせん光の発光波形は強いていえば不等辺三角形状で、発光開始から最大値になるまでの時間（立上がり時間）は非常に短く、最大値から0になるまでの時間（立下がり時間）は立上がり時間より1桁以上長く、しかもゆっくり変化している。また、台形波の場合にはせん光が最大値になってからある時間持続するが、キセノンせん光の場合は、最大値は瞬時値ですぐ減衰してしまう。

このように発光波形が大きく違う光の実効光度を計算するのに、同じブロンデル・レイの式を使ってよいかどうかは、実験によって確かめるべきである。

しかし、そのような心理物理的実験をすることは、この委員会の手に余ることであり、また本来の目的でもない。また、理論的裏付けはともかく、前記の各条約で、ブロンデル・レイの式によって実効光度を求めると規定してあるので、この委員会では、この問題に詳しく立入ることはしなかった。

1.2.2 明所視と暗所視

せん光の物理的な測定（測光）そのものにも実は問題がある。それは、人間の眼の分光応答度^{*)}が明るさによって相当に変わることを考えていないことである。

光もテレビや通信に使う電磁波の一種で、特に眼に明るさの感覚を与えるものをいう。したがって、光の明るさを測るということは、電磁波のパワーを、眼の分光応答度と同じ分光応答度を持つ受光器で評価するということになる。

問題なのは、普通、光の明るさを扱うときは、約束で、人間の眼は明るいものを見ている状態（「明所視」の状態）になっているとしていることである。しかし、この報告書の対象になるせん光を見るのは、ほとんどの場合は夜なので、眼の分光応答度は暗いものを見る状態（「暗所視」の状態）になっている。したがって、上記の、ブロンデル・レイの式の問題を別にしても、眼に感じる明るさは物理的な測定値とは違うはずである。

しかし、この点についても、この委員会では、条約でそう決められているから、ということだけで割り切ることにした。

1.3 報告書の構成

報告書の構成は目次に示したとおりであるが、各章の内容を簡単に紹介しておく。

2 被測定光源（単発光型キセノン放電ランプ）の特性：この報告書で扱うキセノン放電ランプについて、放電管の特性と形状、発光の原理などを解説してある。また、せん光

*) 以前は分光感度といった。

の分光特性と時間的特性（発光波形）との実測例，それに，発光波形の時間周波数スペクトルを示してある。

3 測定方法の種類と測定の原理：光度の時間積分値を直接求める方法と，波形記録装置に発光波形を描かせて，それを解析する方法の2通りを解説してある。

4 測定装置：上記の測定を行うには，どのような光電素子を使うのがよいのか，また，どのような回路を作ればよいかを説明してある。

光電素子については，最近ではシリコンフォトダイオードが主流になっているので，ここにあげた回路の例では，シリコンフォトダイオードを使用したものに限定している。しかし，白熱電球の光のように，赤外放射の多い光の測光量（可視放射）を測定するときには，赤外放射に対する感度がシリコンフォトダイオードより低い光電管を使ったほうが誤差を小さくできるということがあるので，光電管などの他の光電変換素子についても詳しい解説をした。

光電素子の項には，代表的な光電管とシリコンフォトダイオードについて，分光応答度を標準比視感度に合わせる方法を，使用するフィルタの製品名をあげて具体的に説明してある。このような記述は今までのハンドブックには無いもので，せん光に限らず，測光技術者にとって非常に貴重で有用なデータである。

5 測定方法：ここでは，測光器の目盛り校正の方法，受光器の相対分光応答度が標準比視感度に合っていないときの補正方法（色補正係数の求め方），測定や校正をするときに注意しなければならないことなどを，実測例を交えて説明している。また，市販の，写真用フラッシュメータを使っても，ある程度の精度で実効光度を測定できることを説明してある。

6 実測例：具体的な測定例をあげ，測定に際しての注意事項などを示してある。

上記4に例を示した回路は，せん光時間が相当短いせん光でも，その発光波形を正しく波形観測装置のスクリーン上に表示でき，かつ光度が正確に測定できるように，周波数特性（応答時間）を厳密に検討して作ったものである。しかし，この項に示した測定例の測定装置の周波数特性はあまり良くないので，せん光時間が10 μ s程度の短いせん光の場合には，波形観測装置（ここではオシロスコープ）に表示された波形は，元のせん光波形と多少変わっている。

興味深いのは，発光波形は崩れても，測光量には実際上誤差がないことである。この結果から，正確な発光波形を知らなくてもよいのならば，回路の周波数特性にはそれほど神経を使わなくてよいということが分かる。

7. **せん光の測定を行っている公的機関名と測定内容**：主な公的機関として、電総研、艦装品研、日写研をあげ、業務内容の概要を紹介してある。くわしい問い合わせや打合せができるように、担当者名も記してある。

なお、電総研では、原則として、一個人、一会社からの測定依頼には応じないが、内容によっては、技術指導の形で、電総研の設備を使用して測定の指導をすることがある。

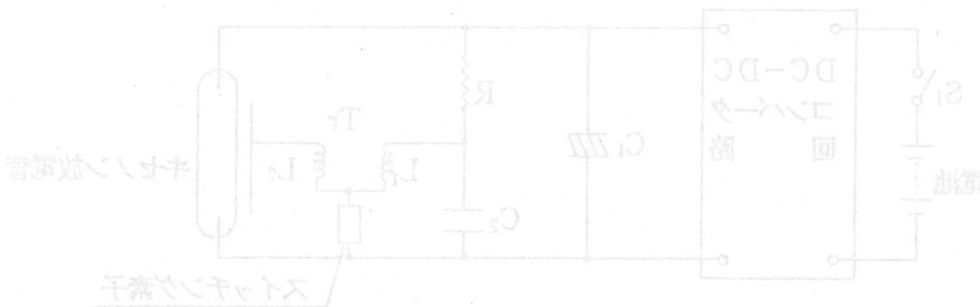
このほか、現在はせん光の測定をしてないが、測光関係の依頼試験を引受けている公的機関名もあげてある。

8. **関連規格**：この委員会の設置目的である、救難・障害信号の条件を規定している SOLAS 条約と国際民間航空条約の中の関連部分を紹介してある。また、参考規格として、せん光の測定方法を規定している J I S 規格と I S O 規格の名称、番号を載せてある。

9. **参考文献**：参考文献は各章に記してあるが、読者の便宜のために、すべての文献名を、この章にまとめて載せた。

10. **資料名**：参考文献と同様に、各章に出てくる参考資料名を、この章にまとめて示した。

木基の光談 8 . I . S



この DC-DC 変換回路は、トランスの二次側を整流して、コンデンサで平滑し、ダイオードで逆起電力防止回路を構成し、最終的に LED を駆動する。この回路は、LED の寿命を延ばすために、電圧を安定に保つことが重要である。また、LED の色温度や光束を制御するために、電流を安定に保つ必要がある。このため、電圧レギュレーションと電流レギュレーションの両方を確保することが必要である。

2. 被測定光源の特性

2.1 キセノン放電管の基本的な形状と発光原理

2.1.1 キセノン放電管

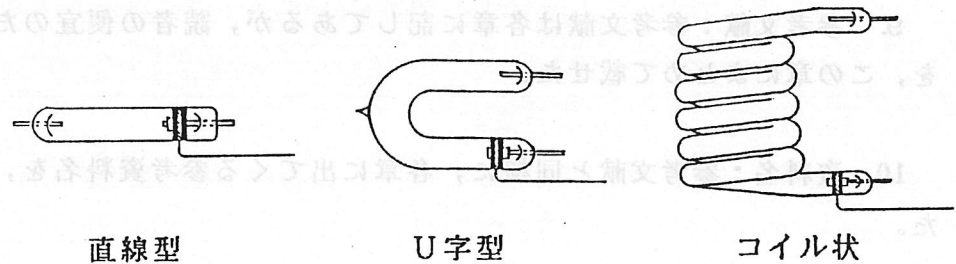
キセノン放電管は、硝子管にキセノンガスを封入し、硝子管内に突出したアノード、カソードは硝子に封着され、トリガ電極はガラス外面に塗布された透明導電膜又は放電管の外周に巻き付けたワイヤで構成されている。

キセノン放電管は、コンデンサに蓄積された電気エネルギーを閃光に変える。閃光の分光エネルギー分布は天然昼光に近く、一般に同一形状寸法では封入ガス圧が高い程明るくなるが発光開始電圧は上昇する。

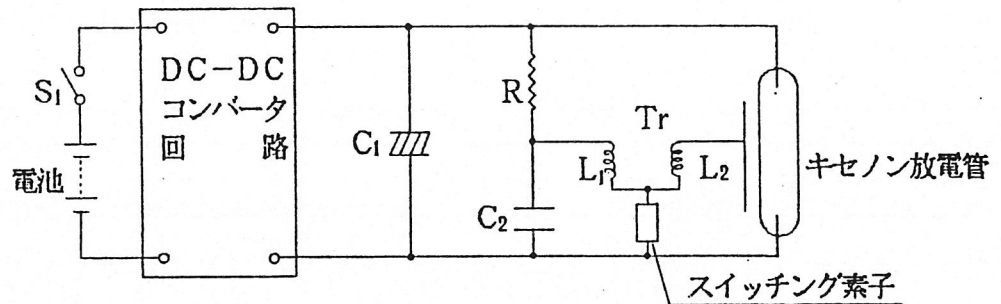
2.1.2 放電管の形状

一般に使用されているキセノン放電管の形状は、直線型、U字型、コイル状の三種であるが特殊なものとしては、これらの組合わさったものがある。

また、大きさは用途に応じて種々ある。



2.1.3 発光の基本



上記回路図は、基本的な発光回路で電源スイッチ S_1 を閉じるとDC-DCコンバータ回路で昇圧され、主コンデンサ C_1 に蓄積された数百ボルトの直流電圧が、キセノン放電管のアノードとカソードに印加されているが、この状態ではキセノン放電管は発光しない。

発光させるためにはトリガが必要で、トリガ回路は、抵抗 R とトリガコンデンサ C_2 、トリガトランス Tr 、スイッチング素子等で構成され、 C_2 の電圧が或る値になるとスイッチング素子が通電し C_2 に蓄積された電荷がトリガトランスの一次側 L_1 にパルスとなって流れトリガトランスの二次側 L_2 に高圧パルスが発生する。

2.2. せん光の分光特性

図 2.2-1に、波長範囲 355 nm～930 nm でのキセノンせん光の相対分光エネルギー分布の例を示す。

一般に、キセノンせん光の分光分布は、可視域では、同じ（相関）色温度の昼光（太陽光と天空光の合わさった光）の分光分布に近い。しかし、近赤外域の約 830 nm, 885 nm それに905 nm に非常に強度の強い輝線がある点は昼光と違う。

キセノンせん光の分光特性は、以下にあげるような、電氣的、機械的な要素によって変わる。透明な放電管の場合には、分光特性の変化の程度は、色温度で表すと、約5500K から7500Kである。図2.2-1 に示したキセノンせん光の相関色温度は約5800Kである。

- (1) コンデンサの静電容量¹⁾²⁾
- (2) コンデンサの充電電圧¹⁾²⁾
- (3) 放電管の電極間距離（アーク長）²⁾

一般に、コンデンサの充電電圧が一定ならば、静電容量が大きい方が色温度は高くなる。静電容量が一定ならば、充電電圧が高い方が色温度は高くなる。また、放電管の電極間距離が短い方が色温度は高くなる。

この報告書の目的は、分光特性あるいは色温度が特に規定されていないせん光の全発光時間について、そのせん光の実効光度の測定方法を設定することなので、直接の関係も影響もないが、実は、図 2.2-2に示したように、せん光の分光特性は、発光時間内で刻刻変化している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。変化の程度は色温度にして高々数百Kなので、目ではほとんど分からないが、写真用の調光式エレクトロニックフラッシュを使ってカラー写真を撮るときのように、被写体距離によって利用するせん光の光量を変えるときは、分光特性も変えることになるので、写真の色の変化が問題になることがある。

参考文献

- (1) 千葉ほか：写真用エレクトロニックフラッシュの時間分解分光測光。電気学会・光応用・視覚研究会資料 LAV-80-28（昭55）
- (2) 千葉：ストロボ（エレクトロニックフラッシュ）光の色再現。写真工業 昭和56年12月号 84～90
- (3) 大日方：キセノンせん光管における発光の時間特性と相関色温度との関係について。昭和51年照明学会東京支部大会予稿 27
- (4) 大日方：調光式エレクトロニックフラッシュの分光分布について。昭和51年度照明学会全国大会予稿 94
- (5) 大日方：調光式エレクトロニックフラッシュの分光特性。電総研ニュース 320号 8～11（昭51）
- (6) Chiba et al.: Measurement of temporal spectral characteristics of flashing light. Appl. Opt. Vol. 20, 2169～2170 (1981)
- (7) Chiba et al.: Automatic apparatus for measuring temporal spectral characteristics of flashing light

図3. 5-3. 45°入射角の光の放射強度の分光分布の測定

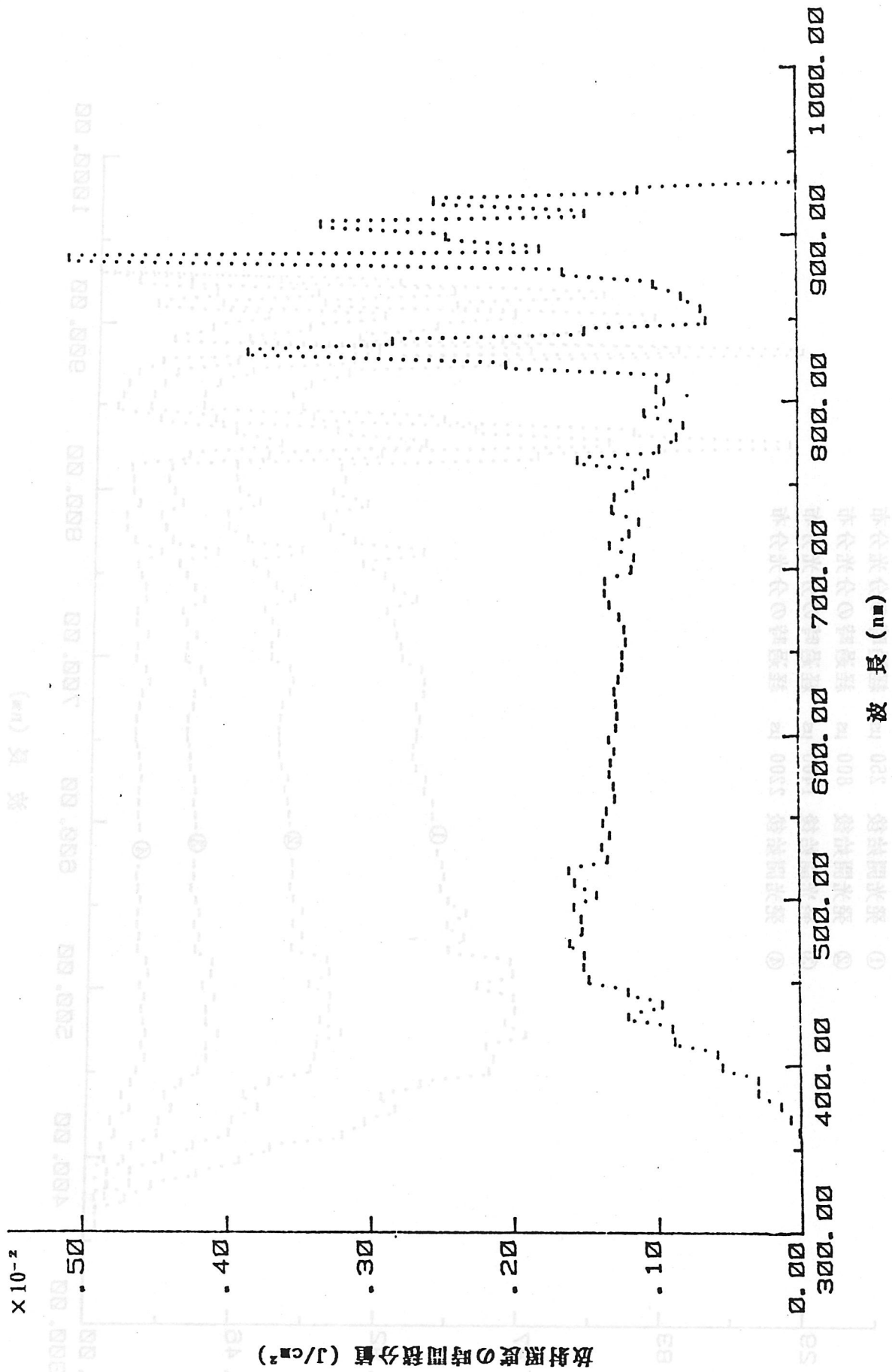


図2. 2-1 キセノン光の分光分布

- ① 発光開始後 250 μ s 経過時の分光分布
- ② 発光開始後 800 μ s 経過時の分光分布
- ③ 発光開始後 1400 μ s 経過時の分光分布
- ④ 発光開始後 2200 μ s 経過時の分光分布

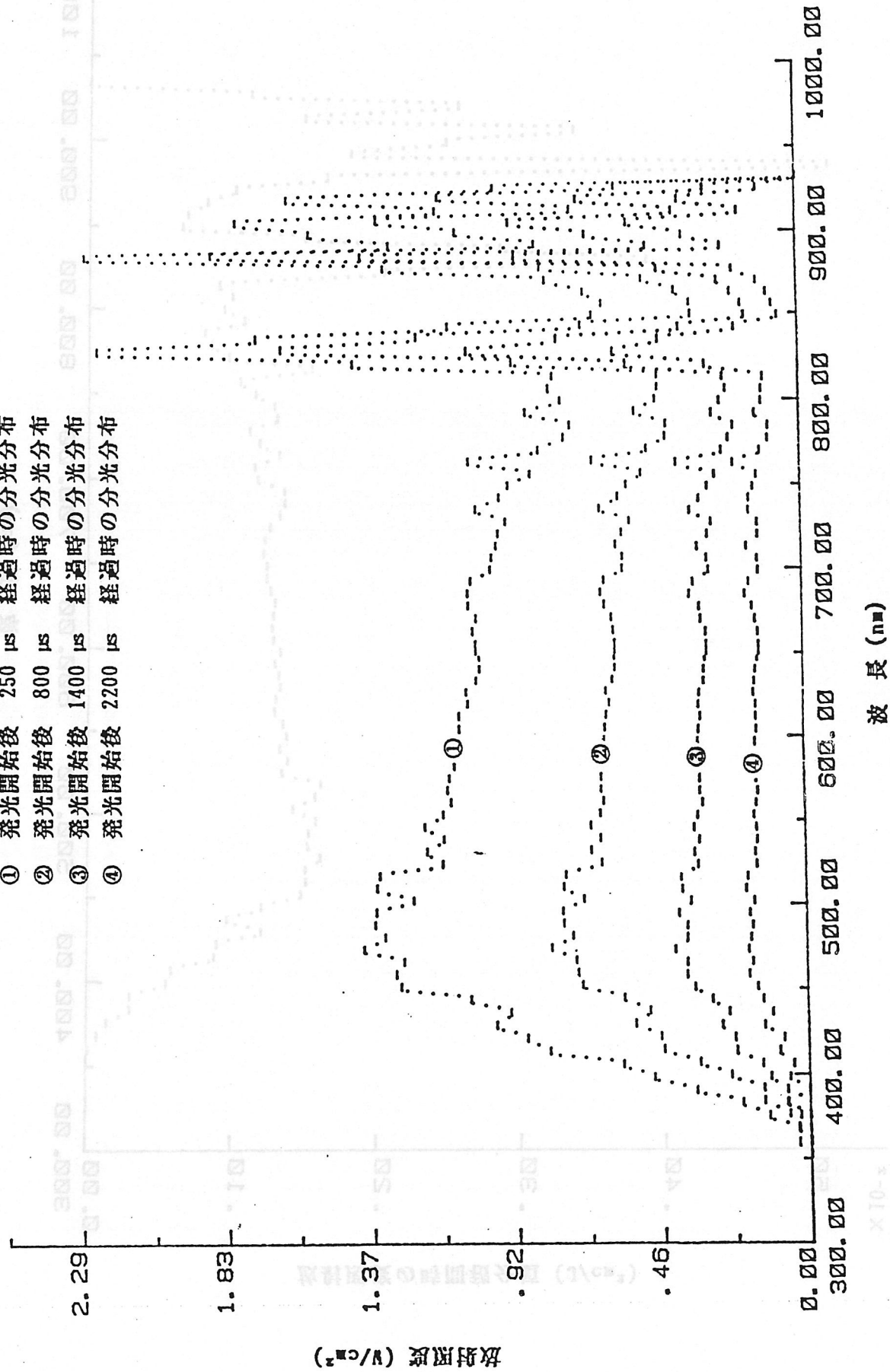


図2. 2-2 キセノンせん光の発光時間内での分光分布の変化

2.3 せん光の発光波形の時間周波数スペクトル

せん光は、発光の持続時間の短い放射で、しかも、その放射強度が時間的に変化し、せん光光源の種類によっては分光分布もまた発光時間内で変化する。⁽¹⁷⁾

すなわち、指向性配光をもつ白熱電球を、遮光スリット内で回転させて、せん光を得る場合や定常光を、セクタで切ってせん光を得る場合には、放射強度が時間的に変化するのみで、分光分布は不変であるが、キセノン・フラッシュランプやパルス電流で白熱電球を点灯する場合には、発光時間内に放射強度が変化するほか、分光分布もまた変化する。

したがって、分光分布の変化するせん光の放射強度は、時間 t と波長 λ の関数で表され、 $I_e(t, \lambda)$ と記述される。図 2.3-1 は、キセノン・フラッシュランプの分光放射の波長 451、553、647、及び 883 nm の時間軸上の波形を示したものであり、波長 451 nm と 883 nm とでは、波形が大きく異なっていることがわかる。

この様な単一波長 λ_i の放射の時間周波数スペクトル $F_{\lambda_i}(\omega)$ はその時間軸上の波形のフーリエ積分により求められ、(2.3-1) 式で示される。

$$F_{\lambda_i}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I_e(t, \lambda_i) \cdot \delta\lambda \cdot \exp(-j\omega t) dt \quad (2.3-1)$$

ただし、 $\delta\lambda$: 波長 λ_i を中心とする微小波長幅

この複素関数 $F_{\lambda_i}(\omega)$ の絶対値 $|F_{\lambda_i}(\omega)|$ が時間周波数の振幅スペクトルである。

図 2.3-2 は、キセノン・フラッシュランプ点灯回路のコンデンサの容量を変え、ランプの注入エネルギーを変化させて発光させたときの放射束を PIN ホトダイオードで受光し、その出力より振幅スペクトルを求めた結果である。この図から明らかなように、注入エネルギーが小さいほど振幅スペクトルは高い周波数まで広がる。したがって、せん光の放射束を測定する場合には、分光分布の全波長における発光波形のもつ時間周波数の振幅スペクトル成分の最も高い周波数まで、受光器や電子回路の周波数帯域は平坦な周波数特性を有していなければならない。いま、視感度補正された受光器の分光応答度を $R_v(\lambda)$ とすれば、受光器出力の周波数スペクトル $F_R(\omega)$ は、(2.3-2) 式となる。

$$F_R(\omega) = K_R \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{\lambda} \phi_e(t, \lambda) \cdot R_v(\lambda) d\lambda \right] \exp(-j\omega t) dt \quad (2.3-2)$$

ただし、 $\phi_e(t, \lambda)$: $I_e(t, \lambda)$ の受光面へ入射する放射束

K_R : 受光器の光電変換係数

この振幅スペクトル $|F_R(\omega)|$ は、波長に関して視感度で重み付けした放射束

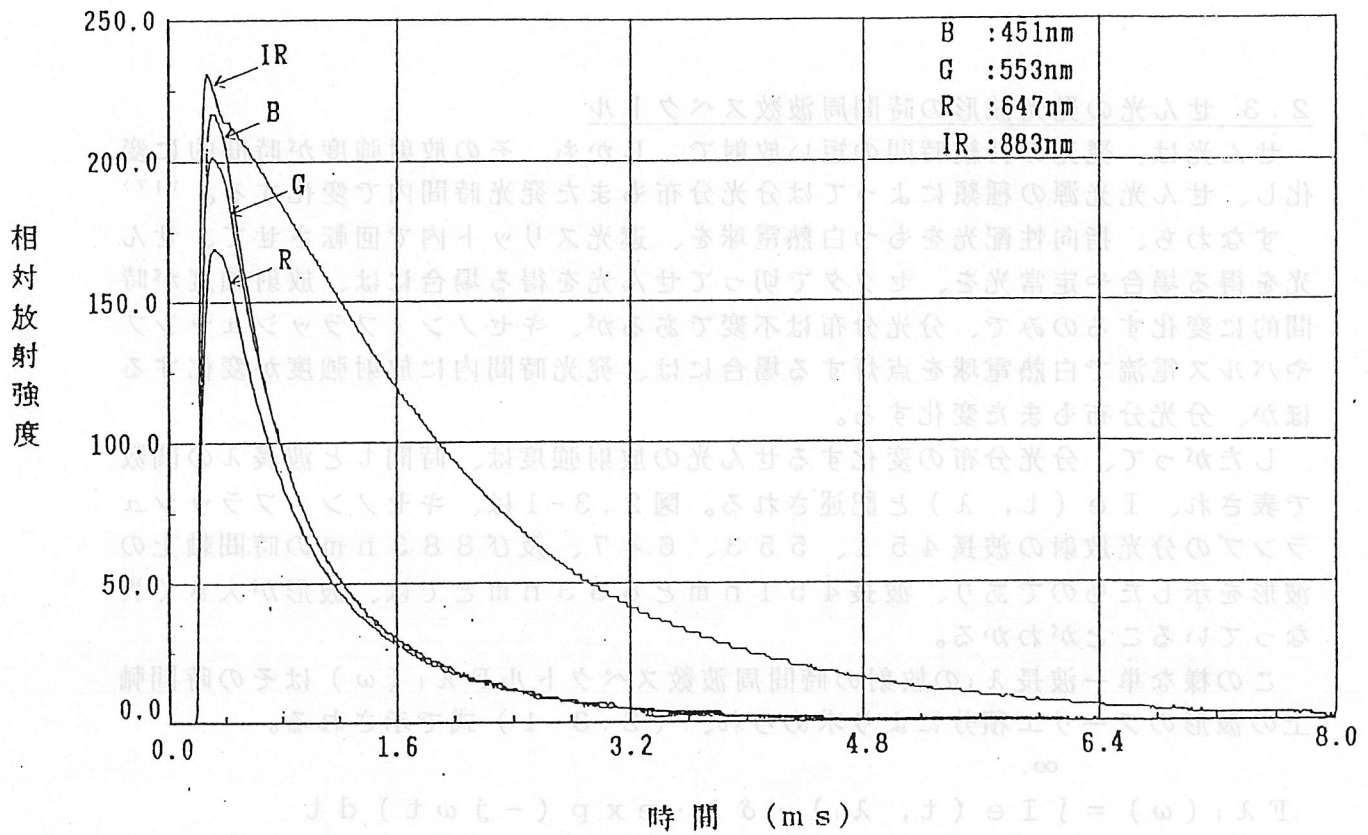


図 2.3-1 放射強度の時間的变化

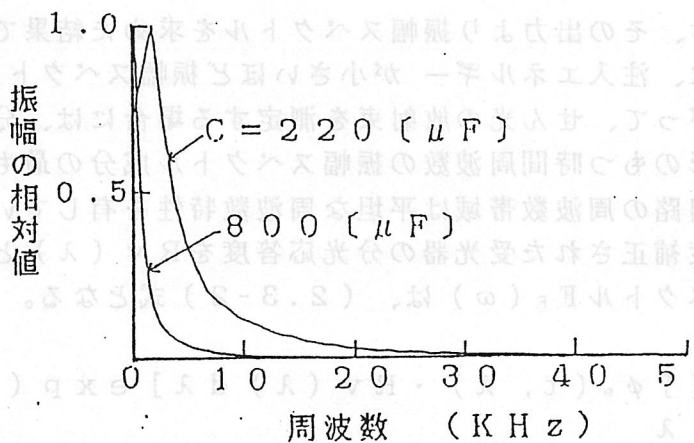


図 2.3-2 時間周波数スペクトル

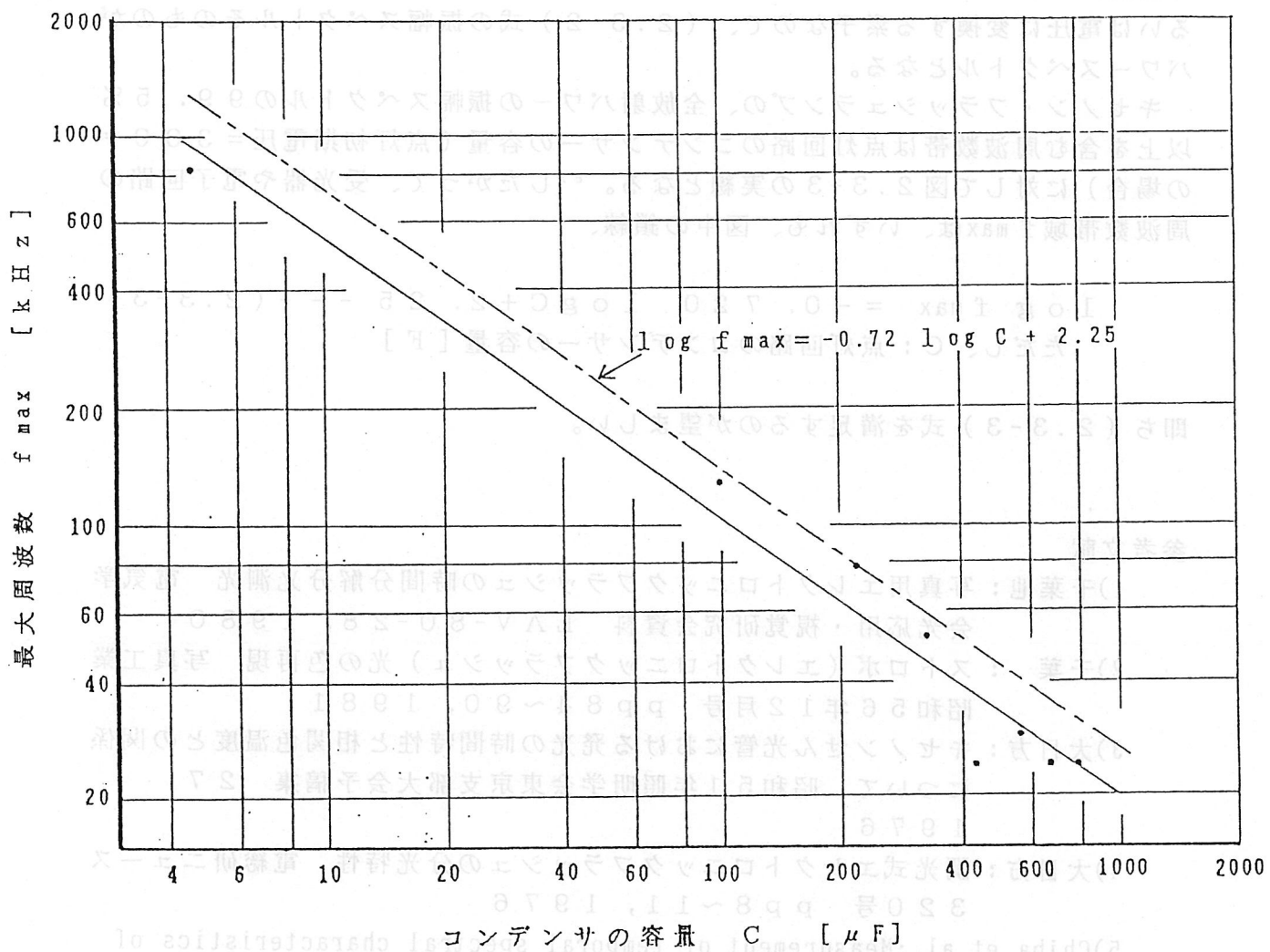


図2.3-3 最大周波数

の振幅スペクトルである。ただし、受光器は、受光面に入射するパワーを電流あるいは電圧に変換する素子なので、(2.3-2)式の振幅スペクトルそのものが、パワースペクトルとなる。

キセノン・フラッシュランプの、全放射パワーの振幅スペクトルの99.5%以上を含む周波数帯は点灯回路のコンデンサーの容量(点灯初期電圧=300Vの場合)に対して図2.3-3の実線となる。⁶⁾したがって、受光器や電子回路の周波数帯域 f_{max} は、いずれも、図中の鎖線、

$$\log f_{max} = -0.720 \log C + 2.25 \quad \text{--- (2.3-3)}$$

ただし、C: 点灯回路のコンデンサーの容量[F]

即ち(2.3-3)式を満足するのが望ましい。

参考文献

- 1)千葉他: 写真用エレクトロニックフラッシュの時間分解分光測光 電気学会光応用・視覚研究会資料 LAV-80-28, 1980
- 2)千葉 : ストロボ(エレクトロニックフラッシュ)光の色再現 写真工業昭和56年12月号 pp84~90, 1981
- 3)大日方: キセノンせん光管における発光の時間特性と相関色温度との関係について 昭和51年照明学会東京支部大会予稿集 27
1976
- 4)大日方: 調光式エレクトロニックフラッシュの分光特性 電総研ニュース 320号 pp8~11, 1976
- 5)Chiba et al.: Measurement of temporal spectral characteristics of flashing light. Appl. Opt. Vol.20, pp2169~2170, 1981
- 6)石井他: Xenon Flash LampとLight Spot Sensorを組み合わせた移動体検出システムの雑音指数 電気学会光応用・視覚研究会資料 LAV-83-2 pp11~20, 1983
- 7)石井他: Xenon Flash Lampの光電変換特性 昭和60年照明学会全国大会講演論文集 46, 1985
- 8)石井他: Xenon Flash Lampの放射束の時間周波数スペクトル 昭和63年照明学会全国大会講演論文集 106, 1988

3 測定方法の種類と測定の原理

3.1 コンデンサ方法

Blondel-Rey によれば、実効光度は次の式によって計算できる。

$$I_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt}{C + (t_2 - t_1)}$$

ここに I_e : 実効光度 (cd)
 $I(t)$: 発光時間中のある時刻における光度 (cd)
 t_1 : 積分開始時刻
 t_2 : 積分終了時刻
 $t_2 - t_1$: 積分時間 (s)
 C : 定数 (s)。0.2 又は 0.21 が用いられる

この報告書の対象になるせん光の発光時間は、数十 μ s から数 ms なので、上式の分母の $(t_2 - t_1)$ は C の値にくらべて無視できる。したがって、光度の時間積分値 (cd·s) を C の値で割れば実効光度が求められる。

光度の時間積分値を直接測定することはできないので、実際は、光源からある距離 s 離れたところで照度の時間積分値 (露光量: lx·s) を測定し、距離の逆二乗則から、次の式によって光度の時間積分値を計算で求める。

$$I(t) dt = s^2 \int E(t) dt = s^2 \cdot H$$

ここに $E(t)$: 光源から距離 s 離れた点での、発光時間中のある時刻における照度 (lx)
 H : 露光量 (照度の時間積分値: lx·s)
 s : 光源と受光面との距離 (m)

したがって

$$I_e = \frac{s^2 \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt}{C} = \frac{s^2 \cdot H}{C}$$

ただし、距離 s は、光源の最大寸法の10倍以上なければならない。

3. 2 波形解析方法

コンデンサー方式との相違点はBlondel-Reyの式における分子〔光度の時間積分値 ($\int_{t_1}^{t_2} I(t)dt$)〕を、照度の時間積分値を直接測定し距離の逆二乗法則を用いて求めるのではなく、照度の時間に対する波形（以下波形という）を測定したのち計算によって積分して求める点にある。このため、コンデンサ方法に比べて、発光時間の長いせん光でも測定可能であるという利点がある。

実際上はオシロスコープを用いて写真撮影するかADコンバータを介して取り込んだ波形の縦軸の照度を距離の逆二乗法則によって光度に換算し、また波形上から光度の立ち上がり点を積分開始時刻 (t_1) とし、光度が零になった点を積分終了時刻 (t_2) として積分を行なう。積分時間 ($t_2 - t_1$) の決定は、この報告書の対象となるせん光の場合にはBlondel-Rey式の分母にある定数 (0.2) に比べて非常に小さいので問題はないが、8章で述べられている国際規則等で使用されているBlondel-Reyの式では、積分時間 ($t_2 - t_1$) は実効光度が最大になるように選ぶとされており、白熱電球の点滅のように発光時間が長い場合には注意を要する。

測定にADコンバータを使用する場合には最低8bit（縦軸256分解）のもので、サンプリングレート1 μ s以下のものを選ばなければ、この報告書の対象であるせん光は測定できない。キセノンフラッシュランプの発光波形が滑らかであり、発光開始時刻と発光終了時刻を確認できる分解能であれば、(t_1)と(t_2)の時間設定以外の誤差要因は少ない。

この報告書の対象が数十マイクロ秒からのせん光を対象としていることから、1 μ s以下の分解能を持てば実効光度計算には十分である。

照度（光度）の軸の分解能は、8bitのADコンバータを使用した場合256分解になる。実際の使用にあたっては、256分解の半分程度の位置に波形のピーク値がくるとして、100分解程度になる。AD変換が正確に行われたと仮定した場合、最大の誤差要因は零点の設定である。

仮にサインカーブの0から π までをピーク値100として計算し、零点を1dot分ずらした場合の差は約1.6%である。実際の発光波形に近いポアソン分布状の曲線を同様に計算しても差は $\pm 5\%$ 以内である。

4. 測定装置

4.1 コンデンサ方法

4.1.1 光電素子

4.1.1-1 分類と種類

実用化されている光検出素子を動作原理から分類すると、熱型検出素子と量子型検出素子に大別され、後者は内部光電効果型と外部光電効果型に分けられる。

◇熱型検出素子

◇量子型検出素子

- 内部光電効果型検出素子
- 外部光電効果型検出素子

さらに構造や組成および動作方法などから種類が細分化される。このような分類方法で分けた光電素子(光検出素子)の分類と種類を表4.1.1-1に示す。

一方、測光用光電素子が具備すべき条件(性能)として次の10項目が挙げられる。^{1,2)}

- (イ) 光照射時の出力安定性が高いこと。
- (ロ) 長時間の保管に対して経時変化の小さいこと。
- (ハ) 標準比視感度に近似した比分光応答度をもつこと。
- (ニ) 感度の温度係数が小さいこと。
- (ホ) 受光面の感度むらが少ないこと。
- (ヘ) 広い入射光レベルで直線性が良いこと。
- (ト) 周波数特性が良好であること。
- (チ) 機械的強度が高いこと。
- (リ) 取り扱いが簡便なこと。
- (ヌ) 信号対雑音比(S/N)が十分に大きいこと。

これらの項目を満足する光電素子にはいくつかの種類があるが、本測定目的用としてシリコンフォトダイオード(波長範囲 190 ~ 1100 nm)、シリコンPINフォトダイオード(同 190 ~ 1100nm)、あるいはマルチアルカリ光電面光電管などの量子型検出素子が最適と考えられ、視感度補正フィルタと組み合わせて用いる方法を採用。

— 参考文献 —

- (1) 斉藤一朗 電子技術総合研究所 研究報告 第803号(昭和54年10月)
「受光器による実用測光標準の設定に関する研究」
- (2) 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)
照明学会誌 第66巻, 第10号(昭和57年), 439~444頁

表4.1.1-1 (光検出素子の分類と種類)

分 類		種 類	波 長 範 囲
熱型検出素子 1, 2	サーモカップル・サーモパイル ボロメータ, サーミスタ ニューマチックセル 焦電型検出素子	BiSb, BiSn Ni, Ge ゴーレイセル, コンデンサマイクロホン LiTaO ₃ , PbTiO ₃ , PVF ₂ , TGS	
量 子 型 検 出 素 子	光導電型検出素子	真性型 CdS CdSe PbS PbSe HgCdTe	λ_p ; 520 (560) nm Typ. λ_p ; 720 nm Typ. 1 ~ 3 μ m 1 ~ 4.5 μ m 2 ~ 14 μ m
		不純物型 Ge : Au Ge : Hg Ge : Cu Ge : Zn Si : Ga Si : As	1 ~ 10 μ m 2 ~ 14 μ m 2 ~ 30 μ m 2 ~ 40 μ m 1 ~ 17 μ m 1 ~ 23 μ m
	1 ~ 17 内部光電効果型 検出素子	InAs InSb HgCdTe PbSnTe InGaAs-PIN フォトダイオード InGaAs アバランシェ フォトダイオード Ge フォトダイオード Ge-PIN フォトダイオード Ge アバランシェ フォトダイオード Si フォトダイオード Si-PIN フォトダイオード Si アバランシェ フォトダイオード GaAsP フォトダイオード 拡散型 ショットキ型 GaP フォトダイオード ショットキ型 アモルファス フォトダイオード フォトリランジスタ	1 ~ 3 μ m 2 ~ 5.5 μ m 2 ~ 14 μ m ~ 11.4 μ m 900 ~ 1,650 nm 900 ~ 1,650 nm 600 ~ 1,900 nm 800 ~ 1,750 nm 800 ~ 1,750 nm 190 ~ 1,100 nm 190 ~ 1,100 nm 350 ~ 1,050 nm 300 ~ 680 nm 400 ~ 760 nm 190 ~ 680 nm 190 ~ 760 nm 190 ~ 520 nm λ_p ; 500 ~ 600 nm 360 ~ 1,060 nm
1, 18, 19 外部光電効果型 検出素子	光電管 (バイプラナ光電管) 光電子増倍管	Cs-I Cs-Te Sb-Cs バイアルカリ (K-Sb-Cs) マルチアルカリ (Na-K-Sb-Cs) GaAs (Cs) Ag-O-Cs	115 ~ 200 nm 160 ~ 320 nm 160 ~ 650 nm 160 ~ 700 nm 160 ~ 850 nm 160 ~ 910 nm 300 ~ 1,100 nm

参考文献および参照カタログ (データブック)

- (1) 鈴木佐喜雄 編 オプトエレクトロニクス・デバイス応用技術 近代図書 (昭和 62 年 1 月) 50 ~ 105 頁
- (2) 浜松ホトニクス 赤外線検出素子カタログ (1986 年 9 月)
- (3) 富士通 赤外線検知器, 光半導体素子カタログ
- (4) (財) 光産業技術振興協会 監修 光部品・製品活用事典 オプトロニクス社 (昭和 60 年 9 月) 171 ~ 253 頁
- (5) SHARP SEMICONDUCTORS DATA BOOK "OPTOELECTRONICS" (Apr. '85)
- (6) EG & G ELECTRO-OPTICS Silicon Photodiode カタログ
- (7) 三洋電機 アモルファス フォトダイオードカタログ
- (8) TRW Electronic Optoelectronics Data Book
- (9) 光電子工業研究所 受光素子カタログ
- (10) VACTEC OPTOELECTRONICS フォトダイオードカタログ
- (11) CENTRONIC SILICON PHOTODETECTORS カタログ
- (12) TEXAS INSTRUMENTS OPTOELECTRONICS DATA BOOK
- (13) UDT 光検出素子カタログ
- (14) AEG-TELEFUNKEN Optoelectronic Devices 1976 カタログ
- (15) SIEMENS OPTOELECTRONICS CATALOG 1985
- (16) 浜松ホトニクス CdS 光導電セルカタログ (1987 年 2 月)
- (17) 浜松ホトニクス フォトダイオードカタログ (1986 年 9 月)
- (18) 浜松ホトニクス 光電管カタログ (1984 年 9 月)
- (19) 浜松ホトニクス 光電子増倍管カタログ (1986 年 9 月)

4. 1. 1-2 シリコンフォトダイオードと光電管の諸特性
本測定目的に適する光電素子のメーカー名と形名の一例を示す。

◇シリコンフォトダイオード

- シャープ・・・BS530UV, BS530G
- 浜松ホトニクス・・・S1337-1010BRなど

◇シリコンPINフォトダイオード

- 浜松ホトニクス・・・S1723-04など

◇光電管 (マルチアルカリ光電面)

- 浜松ホトニクス・・・R330, R645, R847, PV52など

これらの光電素子の以下の特性項目について、文献報告値とメーカー・カタログ記載値から作成した各特性値を一覧表にし、別表4. 1. 1-2 (a), (b) に示す。

なお、特性の詳細については、各素子メーカーのデータブック、カタログなどを参照されたい。

表4. 1. 1-2 (a), (b) に記載した特性項目

- (イ) 受光面サイズ (受光面積)
- (ロ) 波長範囲 (最大感度波長)
- (ハ) 動作温度範囲
- (ニ) 温度特性 ($T_a = 20 \pm 10^\circ\text{C}$ at $\lambda = 400 \sim 800 \text{ nm}$)
- (ホ) 光入射時における安定性・再現性
- (ヘ) 受光面の感度むら
- (ト) 直線性からのはずれ (光電流の範囲)
[450 nm, 650 nm, 白色光, 電球光 (3000 K, $\sim 800 \text{ nm}$)]
- (チ) 周波数特性 (-3 dB)
- (リ) 応答時間 (立ち上がり時間)
- (ヌ)
 - 経年変化 (2年間, 相対感度)
 - 経時変化 (太陽直射光下64時間, 分光応答)
 - 相対分光応答度の経時変化
- (ル) 視感度補正

表4.1.1-2 (a) (シリコンフォトダイオードと光電管の諸特性)

特 性 項 目	シリコンフォトダイオード			光 電 管 (マルチアルカリ光電管)			
	形 名	特 性 値	文 献	形 名	特 性 値	文 献	
受 光 面 サ イ ズ (受 光 面 面 積)	BS530G BS530UV S1337-1010BR S1723-04	10 × 10 mm (100 mm ²) 10 × 10 mm (100 mm ²) 10 × 10 mm (100 mm ²)	1 2	PV52 R330-02 R645	40 mmφ (1,257 mm ²) 16 mmφ (201 mm ²) 15 mmφ (177 mm ²)	3	
分 光 応 答 波 長 (最 大 感 度 波 長)	BS530G BS530UV S1337-1010BR S1723-04	300 ~ 1,150 nm (800 nm) 200 ~ 1,150 nm (800 nm) 320 ~ 1,100 nm (920 ± 50 nm) 320 ~ 1,060 nm (900 ± 50 nm)	1 2	PV52 R330-02 R645	300 ~ 850 nm (420 nm) 185 ~ 850 nm (420 nm) 185 ~ 850 nm (420 nm)	3	
動 作 温 度 範 囲	BS530G BS530UV S1337-1010BR S1723-04	- 10 ~ + 60 °C - 20 ~ + 60 °C	1 2	PV52 R330-02 R645	~ + 50 °C	3	
温 度 特 性 [Ta = 20 ± 10 °C at λ = 400 ~ 800 nm]	BS530G S780-8BK S876-1010BQ S1337-1010BR S1723-04	± 1 % 以内 [± 0.5 % 以内 V(λ) 受光器において] ± 0.1 % 以内	4 7	マルチ アルカリ 光電管	- 0.2 ~ 0.3 %/°C	7	
光 入 射 時 に お け る 安 定 性 ・ 再 現 性	BS530UV S876-1010BQ BS530UV S1227-1010BQ S1337-1010BQ	安 定 性 0.06 %/h 以内 再 現 性 0.2 %/4 h 以内 再 現 性 (数日間) 190 ~ 280 nm 0.1 ~ 1.6 % (平均 0.4 %) 225 ~ 435.8 nm 0.1 ~ 1.2 % (平均 0.3 %) 390 ~ 780 nm 上記 UV 域の 1/2 程度	4 6				
受 光 面 の 感 度 む ら	BS530G S876-1010BR BS530UV S1227-1010BQ S1337-1010BR S1723-04	電極部で約 10 % 低下 最大 3 % ± 1 % 以内	4 5 7	R330	15 % 以下	6	
直 線 性 か ら の は ず れ (光電流の範囲)	450 nm	BS530G S1134	- 0.1 % (3.4 ~ 340 nA) - 0.1 % (2.5 ~ 310 nA)	4	PV52	- 0.2 % (0.35 ~ 45 nA)	4
	650 nm	BS530G S1134	+ 0.3 % (3.5 ~ 440 nA) - 0.1 % (3.6 ~ 410 nA)		PV52	- 0.2 % (0.4 ~ 50 nA)	
	白色光	BS530G S1134	+ 1.1 % (3.5 nA ~ 43 μA) + 1.5 % (3.5 nA ~ 43 μA)		PV52 R330	- 0.3 % (41 pA ~ 480 nA) - 0.5 % (31 pA ~ 97 nA)	
	電球光 (3000 K, ~800 nm)	BS530UV S1227-1010BQ S1337-1010BQ	- 0.05 % 0.04 %] (n = 2) 0.09 % - 0.15 %] (n = 2) 0.11 % - 0.05 %] (n = 2) (0.1 ~ 3.5 μA)		5		
周 波 数 特 性 (- 3 dB)	BS530G S1227-1010BQ S1723-04	[7.6 kHz (5.6 mA) 9.7 kHz (1.18 mA) -13 kHz (0.10 mA) -4.3 kHz (6.31 mA) 9.6 kHz (1.81 mA) -15 kHz (1.16 mA) 30 MHz [R _L = 50 Ω V _R = 30 V]	4 2				

表4. 1. 1-2 (b) (シリコンフォトダイオードと光電管の諸特性)

特 性 項 目	シリコンフォトダイオード			光 電 管 (マルチアルカリ光電面)		
	形 名	特 性 値	文 献	形 名	特 性 値	文 献
応答時間 (立ち上がり時間)	BS530G	30 μ s Typ. $\begin{cases} R_L = 1 \text{ k}\Omega \\ V_R = 0 \text{ V} \end{cases}$	1			
	S1337-1010BR	3 μ s Typ. $\begin{cases} R_L = 1 \text{ k}\Omega \\ V_R = 0 \text{ V} \end{cases}$	2			
	S1723-04	15 ns Typ. $\begin{cases} R_L = 50 \Omega \\ V_R = 30 \text{ V} \end{cases}$				
経年変化 (2年間)	BS530UV S876-1010BQ	$\pm 0.2\%$ 以内 (3000 K, 650 lx 照射下) - 2 ~ 2.5 % (太陽直射光下)	4			
経時変化 [太陽直射光下] 64時間		最大 - 1.4 % 可視域 0.5 % 以内				
相対分光応答度の経時変化	BS530UV S1227-1010BQ S1337-1010BQ	1 % 以内と推定 (390 ~ 780 nm, 約 10 ヶ月間)	6			
視 感 度 補 正	BS530G + ショット BG-18 コーニング CS3-77 東芝 IRP-70 1.5 mm 厚 オパール板	分布温度 2,045 ~ 3,000 K の 白熱電球光に対する 色補正係数は必要なし (2,856 K 基準)	4			8

[注] BS530G, BS530UV . . . シャープ ブルーセンシティブホットダイオード
 S780-8BK, S876-1010BQ, S1134 . . . 浜松ホトニクス シリコンフォトダイオード (昭和 56 年 10 月製造中止)
 S1227-1010BQ, S1337-1010BQ . . . 浜松ホトニクス シリコンフォトダイオード
 S1337-1010BR . . . 浜松ホトニクス シリコンフォトダイオード
 S1723-04 . . . 浜松ホトニクス PIN シリコンフォトダイオード

参考文献および参照カタログ (データブック)

- (1) SHARP SEMICONDUCTOR DATA BOOK "OPTOELECTRONICS" (Apr. '85)
- (2) 浜松ホトニクス フォトダイオード カタログ (1986 年 9 月)
- (3) 浜松ホトニクス 光電管 カタログ (1984 年 9 月)
- (4) 齊藤一朗 電子技術総合研究所 研究報告 第 803 号 (昭和 54 年 10 月)
「受光器による実用測光標準の設定に関する研究」
- (5) 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)
照明学会誌 第 66 巻, 第 10 号 (昭和 57 年), 439 ~ 444 頁
- (6) 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)
照明学会誌 第 67 巻, 第 10 号 (昭和 58 年), 514 ~ 519 頁
- (7) 浜松ホトニクス 社内データ
- (8) H. Wright, C.L. Sanders and D. Gignac
Design of Glass Filter Combination for Photometer, APPLIED OPTICS Vol. 8, No. 12
(Dec. 1968), P.P. 2449 ~ 2455

4. 1. 1-3 暗電流（雑音電流）と直線性

暗中下において、陰極(cathode)－陽極(anode)間に流れる電流を暗電流と呼び、微弱光レベルにおける測光用光電素子の入射光量と出力（光）電流の直線性を劣化させる一因となる。このような理由から、光電素子メーカーのカatalogには通常この暗電流の値が規定されている。例えば上記した光電素子の暗電流の値をメーカーカatalogから転記すると表4. 1. 1-3のようになる。

表4. 1. 1-3 (シリコンフォトダイオードと光電管の暗電流カatalog記載値)

分類	光電素子の型名	メーカー名	条件 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)	暗電流 (A)		
				MIN.	TYP.	MAX.
シリコン フォト ダイオード	BS530UV	シャープ	$V_R = 1\text{V}$	—	5×10^{-9}	5×10^{-8}
	BS530G			—	5×10^{-9}	10^{-7}
	S1337-1010BR	浜松	$V_R = 10\text{mV}$	—	—	5×10^{-10}
	S1723-04	ホトニクス	$V_R = 30\text{V}$	—	—	10×10^{-9}
光電管	R330	浜松	$E_{bb} = 15\text{V}$	—	—	1×10^{-12}
	R645			—	—	
	R847			—	—	
	PV52	ホトニクス	$E_{bb} = 90\text{V}$	—	—	80×10^{-12}

(注) V_R : 逆バイアス電圧, E_{bb} : 供給電圧, 表4. 1. 1-1の参照カatalogから転記

光電管の暗電流の値は測定光電流に対して十分低く、実装時の周辺回路の絶縁性に配慮すれば本測定目的上無視できるレベルである。ただし、暗室で測定する場合以外は、背景光による光電流が測定精度を低下させるので測定条件に十分注意する必要がある。通常、光電管の直線性範囲の下限は暗電流で、また上限はカatalog記載の尖頭陰極電流の値で制限される。ただし、高電流領域における測定は光電面の電流密度を高めるので、オパールガラスなどの光拡散板を用い、入射光を光電面の全面に均一に拡散させ、陰極電流密度を規格値内に保つことが大切になる。

一方、シリコンフォトダイオードの動作回路は図4. 1. 1-1(a)であり、この等価回路は同図(b)になる。

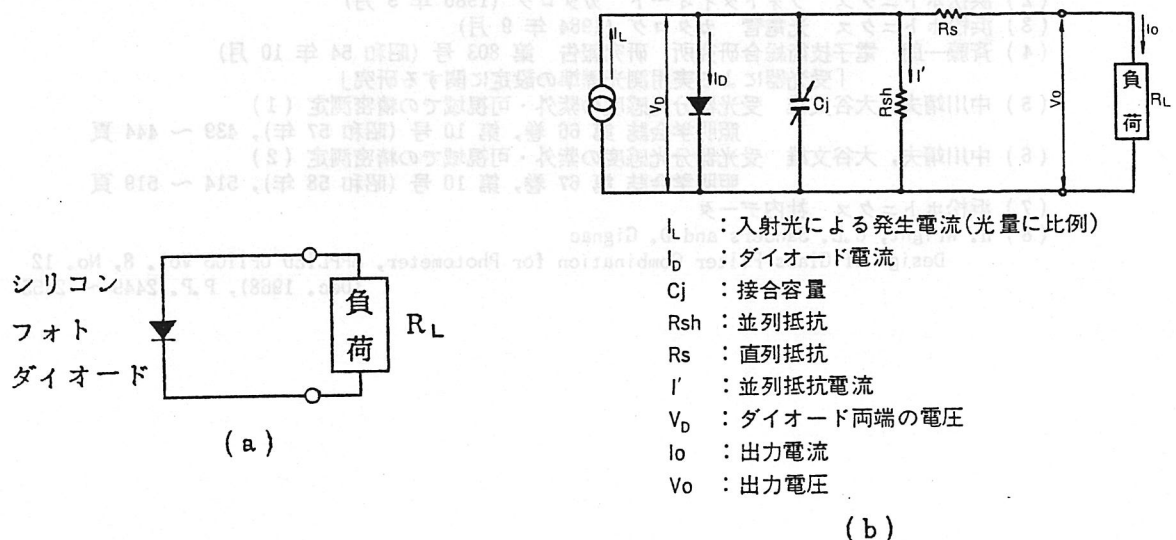


図4. 1. 1-1 (シリコンフォトダイオードの動作回路とその等価回路)

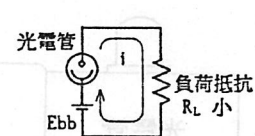
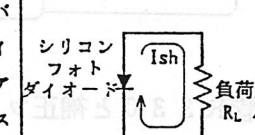
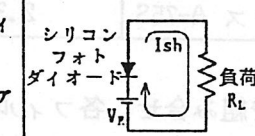
シリコンフォトダイオードの直線性の得られる上限は、負荷抵抗 R_L とシリコンフォトダイオードのチップの接触（オーム接触）抵抗や電極引き出し線の抵抗、および半導体基板材料の比抵抗などによる内部直列抵抗 R_s との和 (R_L+R_s) によって制限され、数 mA ~ 10 mA程度になる。

下限は内部並列抵抗 R_{sh} が発生するジョンソン雑音電流 i_j と、光電流 I_L と暗電流 I_d に起因するショット雑音電流 i_s の和で求まる雑音電流 i_n によって制限される。 ($i_n = \sqrt{i_j^2 + i_s^2}$)

また、シリコンフォトダイオードの動作方法として零バイアス動作方式と逆バイアス動作方式があり、零バイアス動作方式においては、暗電流 I_d は無視できるから、雑音電流 i_n は内部並列抵抗 R_{sh} に発生するジョンソン電流 i_j によるものとなる。一方、逆バイアス動作方式においては、零バイアス動作時に比べ直線性の上限が改善できるが、逆バイアス電圧 V_R が印加されていると必ず暗電流 I_d が存在して、 $V_R > 1\sim 2$ V の領域では $i_s \gg i_j$ となり、暗電流 I_d によるショット雑音電流 i_s によって、また光照射によって光電流 I_L が流れている場合には (I_L+I_d) によるショット雑音電流 i_s で決まる雑音電流 i_n によって直線性の下限が制限される。

以上の関係を一覧表にして、表4. 1. 1-4 に示す。

表4. 1. 1-4 (シリコンフォトダイオードと光電管の直線性)

光電素子	動作方法	直線性が制限される要因	
		下限電流	上限電流
光電管 (R330 など)		暗電流 (約 10^{-12} A)	光電面の電流密度の飽和 [カタログ記載の 尖頭陰極電流 (約 1×10^{-6} A)]
シリコンフォトダイオード (S1337-1010BR, S1723-04)	零バイアス動作 	ジョンソン雑音 i_j による雑音電流 i_n $i_n = i_j = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{sh}}}$	シリコンフォトダイオードの内部抵抗 R_s と負荷抵抗 R_L による短絡電流 I_{sh} の飽和 (イ) 零バイアス動作時
	逆バイアス動作 	暗電流 I_d のショット雑音 i_s による雑音電流 i_n $i_n = i_s = \sqrt{2qI_d}B$	$I_{sh} < \frac{V_D}{R_L + R_s} = V_D/R_L$ (但し、 $R_L \gg R_s$) (ロ) 逆バイアス動作時
		光電流 I_L と暗電流 I_d のショット雑音 i_s による雑音電流 i_n $i_n = i_s = \sqrt{2q(I_L + I_d)}B$	$I_{sh} = \frac{V_D + V_R}{R_L + R_s} = V_R/R_L$ (但し、 $R_L \gg R_s$, $V_R \gg V_D$)

但し、 k : ボルツマン定数
 T : 素子の絶対温度
 B : 雑音帯域幅
 q : 電子の電荷

V_D : シリコンフォトダイオードの順方向電圧
 I_{sh} : シリコンフォトダイオードの短絡電流
 R_{sh} : シリコンフォトダイオードの並列抵抗

4. 1. 1-4 視感度補正方法の一例

光度測定する場合は、光電素子と光学フィルタ(色ガラスフィルタ)を組み合せ、その分光応答度を標準比視感度特性に一致させる必要がある。通常、市販されている各種のフィルタのなかから数枚のフィルタを組み合せて視感度補正を行うが、特性の一致は難しく実際には誤差を含んだものとなる。

このような視感度補正方法の具体例として、マルチアルカリ光電面光電管とシリコンフォトダイオードの視感度補正方法の一例を参考までに示す。

(イ) マルチアルカリ光電面光電管R330の視感度補正フィルタの組み合わせ例

視感度補正には表4. 1. 1-5に示すように2枚のフィルタにオパールガラス1枚を組み合せる。これらのフィルタは、図4. 1. 1-2に示すように光電管の直前に取り付け、研磨などによる分光透過特性の調整は行わず、市販のカatalog規格品をそのまま使用する。

いずれも容易に入手可能なフィルタでの組み合わせであるが、一般的に色ガラスフィルタは湿度の高い雰囲気において失透(結晶析出現象)が生じ、劣化するものがあるので、保管に際しては湿度に対し十分な配慮を必要とする。

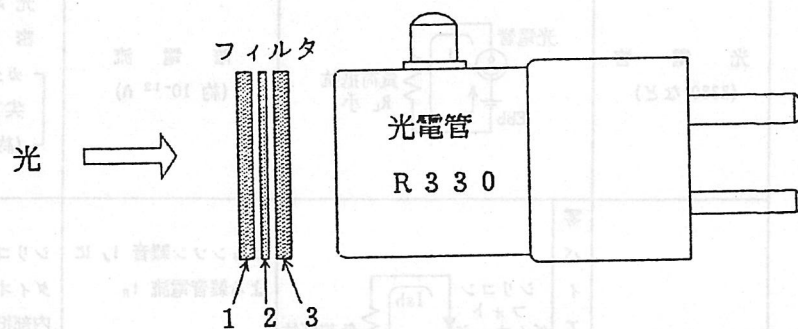


図4. 1. 1-2 (光電管R330と補正フィルタの組み合わせ)

表4. 1. 1-5 (フィルタの名称と板厚)

フィルタの名称	板厚 (mm ^t)
1 オパールガラス	2.02
2 ショット BG 18	1.00
3 東芝ガラス A-75S	2.30

補正フィルタは図4. 1. 1-2の順番で組み合わせ、各フィルタ間は約1mmの間隔を設けてある。また、A-75S フィルタと光電管 R330 の窓板間は約5mm離してある。各フィルタの分光透過特性を図4. 1. 1-3に、またこれらのフィルタを組み合せた場合の相対分光透過特性を標準比視感度特性 $V(\lambda)$ と対比させて図4. 1. 1-4に示す。

光電管 R330 の分光応答度は被測定品個々によって変わるため、視感度補正フィルタと組み合わせた場合の補正曲線にばらつきが生じる。図4.1.1-5に用いた2本の光電管 R330 の相対分光応答度を視感度補正フィルタの相対分光透過特性と対比して示す。被測定球 R330-A は平均的な感度特性球の一例であり、R330-B は長波長側にやや感度の高い特性球の一例である。これらの球に補正フィルタを組み合わせた時の相対分光応答度を図4.1.1-6と図4.1.1-7に標準比視感度特性 $V(\lambda)$ と対比させて示す。

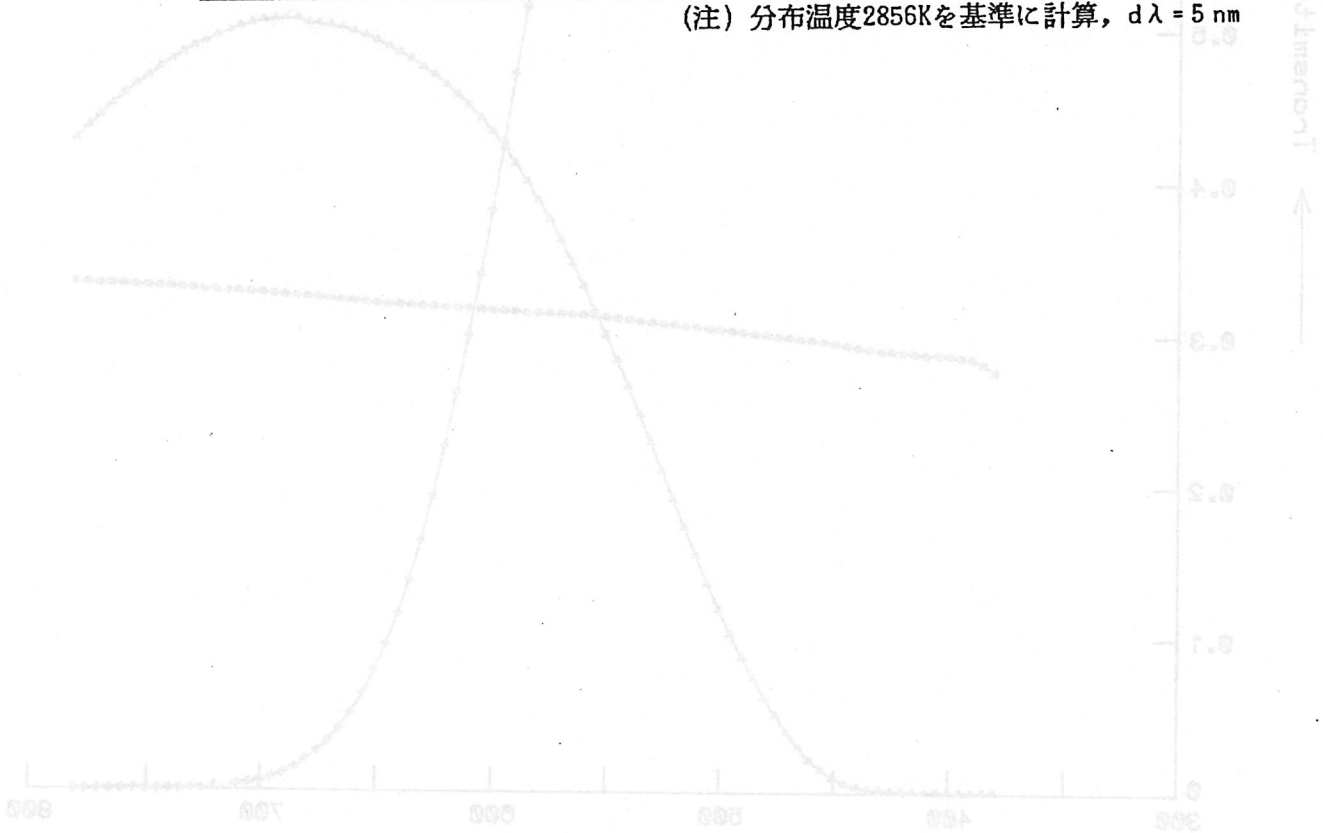
この補正曲線の測定値から、分布温度2,856Kを基準にした時の各分布温度と D_{55} , D_{65} , D_{75} に対する色補正係数の計算値を表4.1.1-6に示す。

なお、色補正係数の値は「5.2 受光器の色補正係数」の項に記載の計算式による。

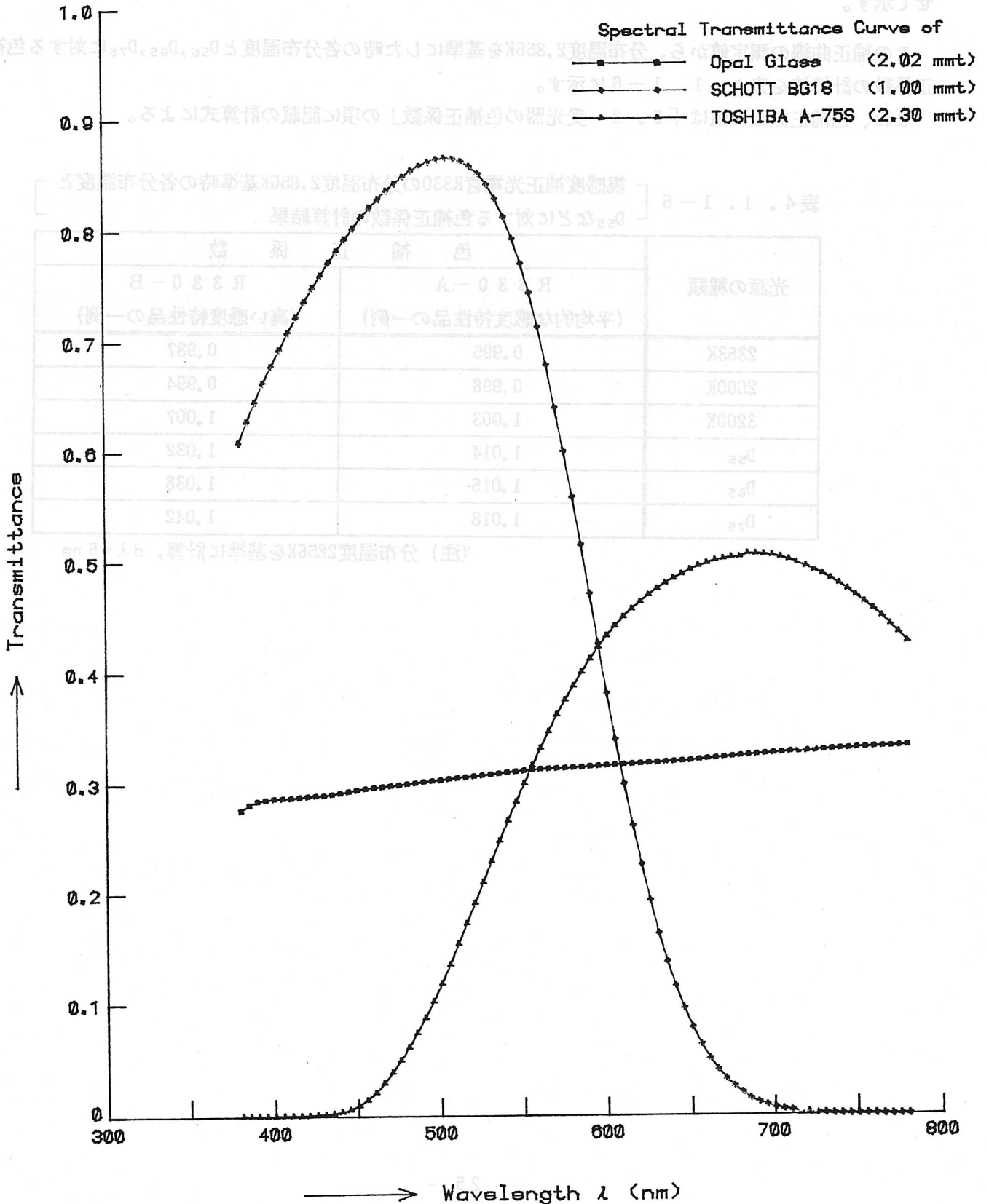
表4.1.1-6 [視感度補正光電管R330の分布温度2,856K基準時の各分布温度と D_{55} などに対する色補正係数の計算結果]

光源の種類	色 補 正 係 数	
	R 3 3 0 - A (平均的な感度特性品の一例)	R 3 3 0 - B (高い感度特性品の一例)
2353K	0.995	0.987
2600K	0.998	0.994
3200K	1.003	1.007
D_{55}	1.014	1.032
D_{65}	1.016	1.038
D_{75}	1.018	1.042

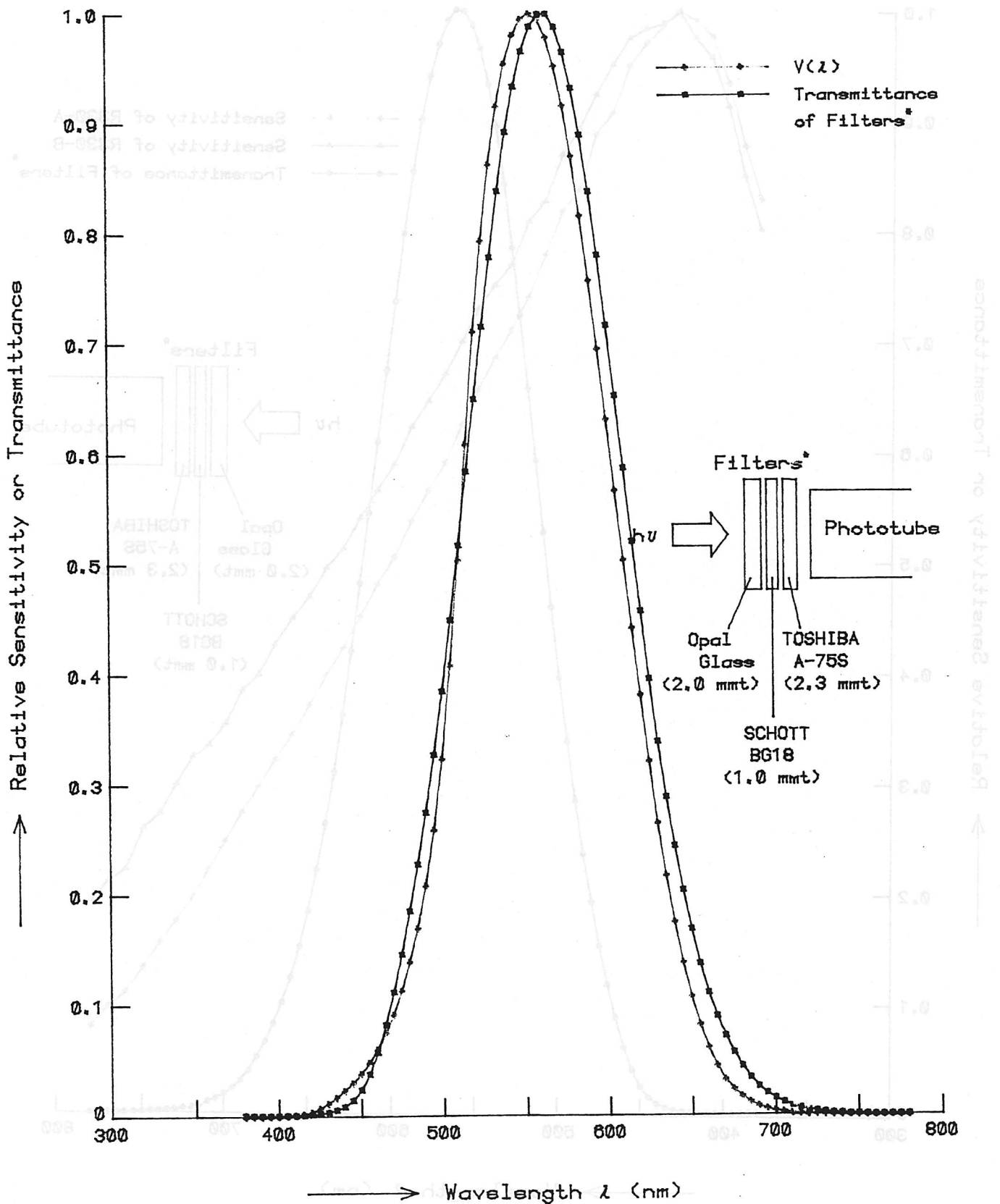
(注) 分布温度2856Kを基準に計算, $d\lambda = 5 \text{ nm}$



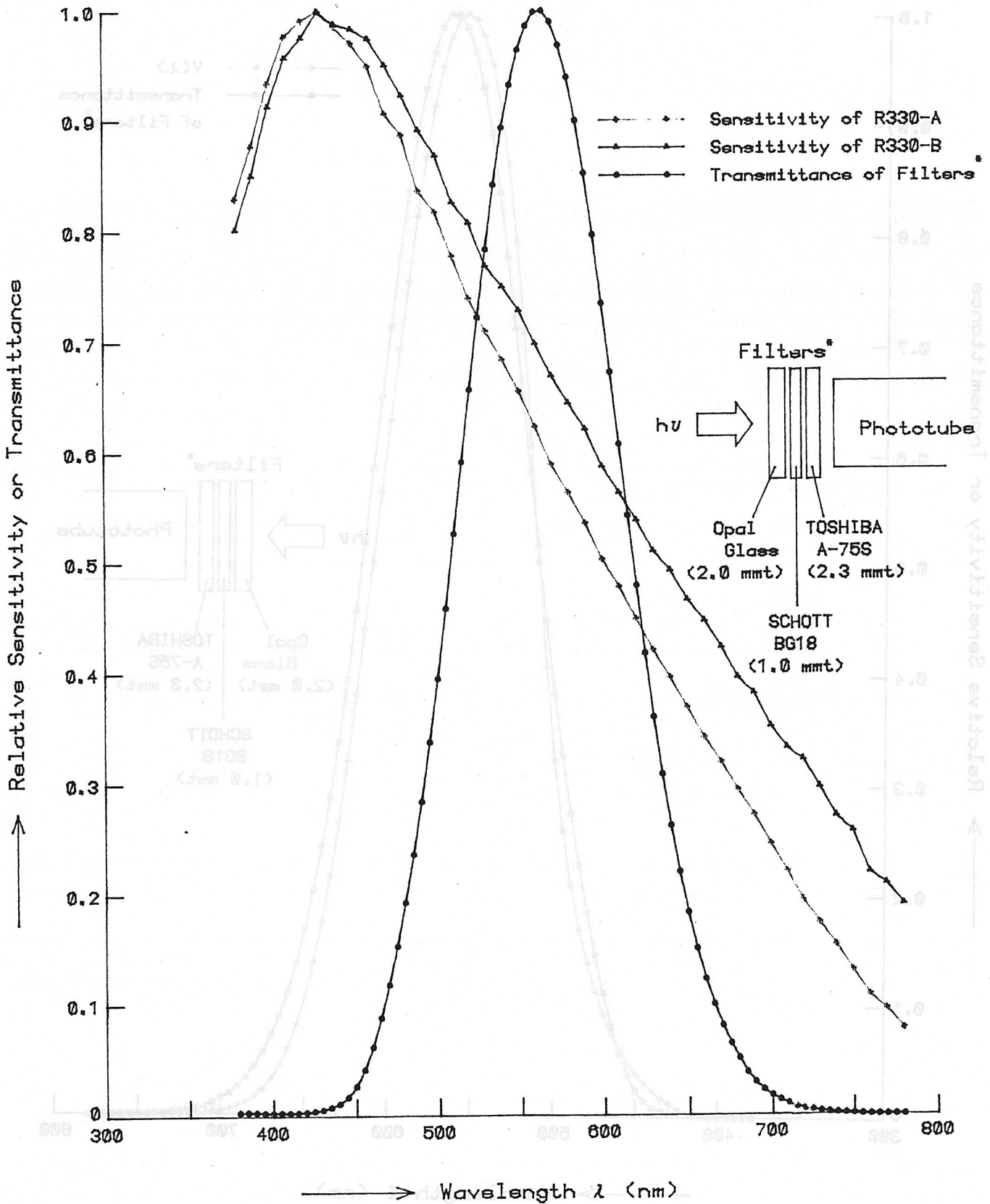
Spectral Transmittance Curves
of Opal Glass, SCHOTT BG18
and TOSHIBA A-75S Filter



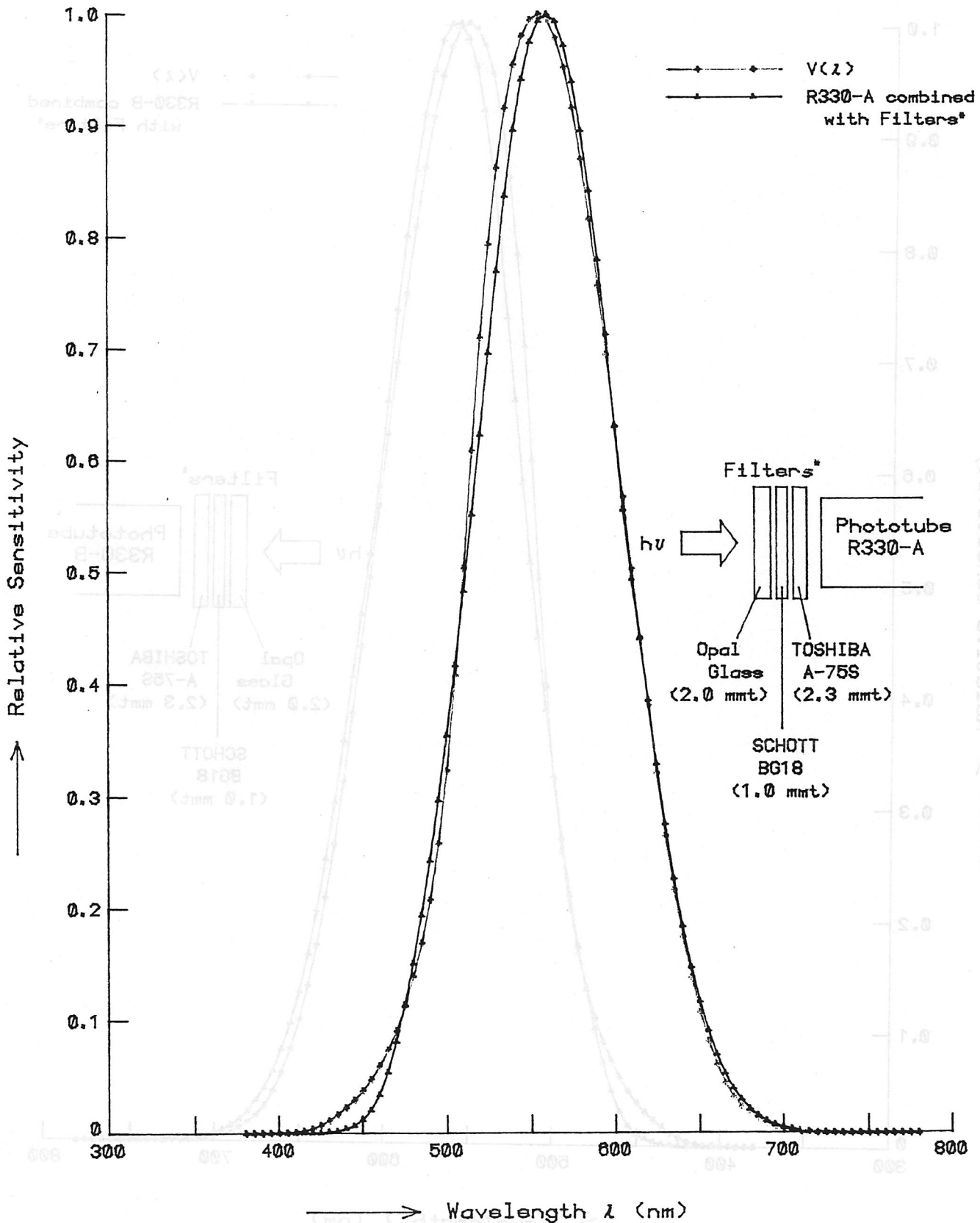
Relative Spectral Luminous Efficiency $V(\lambda)$ Curve
of Photometric Standard Observer
and Relative Spectral Transmittance Curve of Filters*



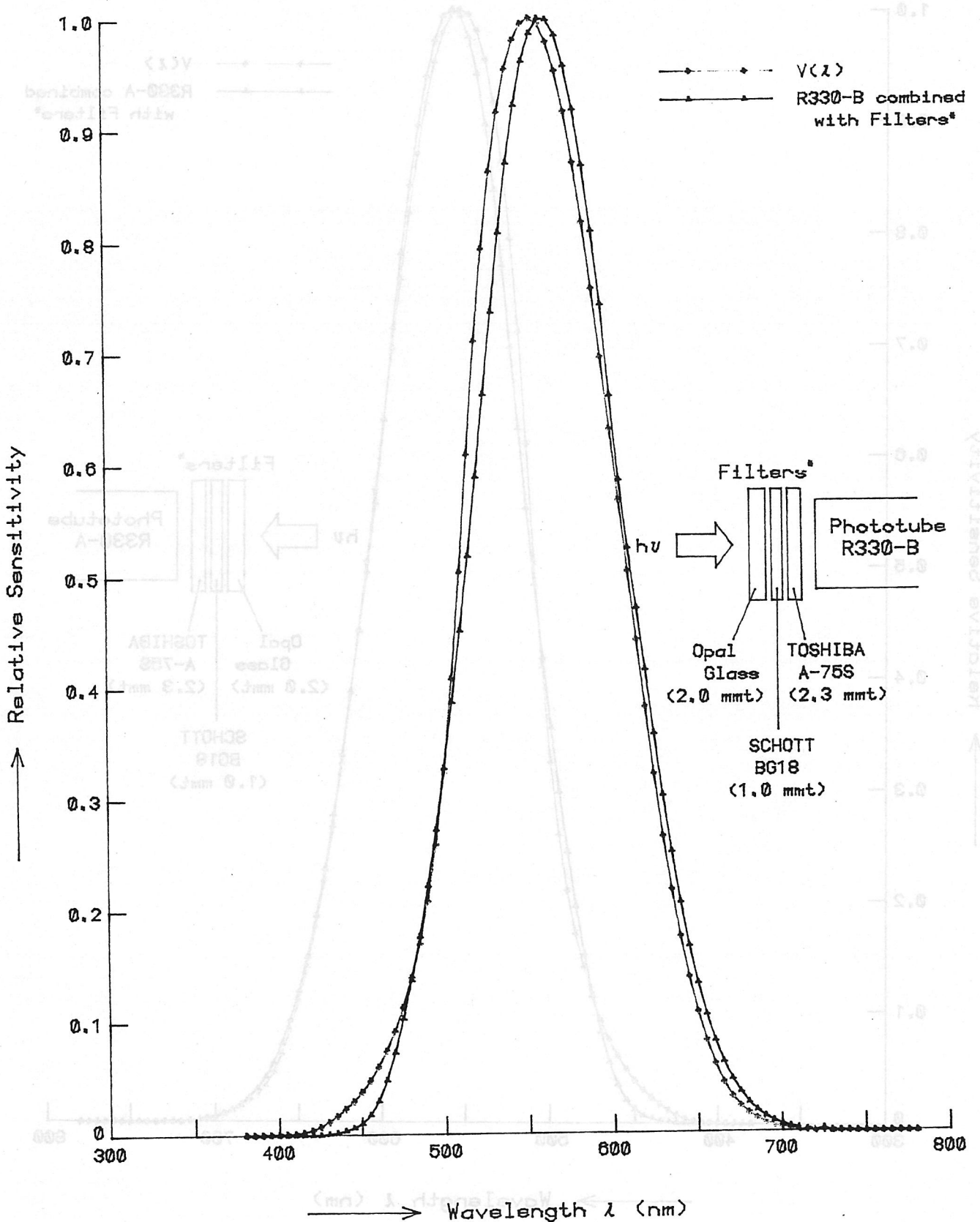
Relative Spectral Transmittance Curve of Filters*
and Relative Spectral Response Curves
of HAMAMATSU R330 Phototube



Relative Spectral Luminous Efficiency $V(\lambda)$ Curve
of Photometric Standard Observer
and Relative Spectral Response Curve
of HAMAMATSU R330 Phototube Combined with Filters*



Relative Spectral Luminous Efficiency $V(\lambda)$ Curve
of Photometric Standard Observer
and Relative Spectral Response Curve
of HAMAMATSU R330 Phototube Combined with Filters*



(ロ) シリコンフォトダイオード S1337-1010BR, S1723-04の視感度補正フィルタの組み合わせ例

図4. 1. 1-8と表4. 1. 1-7に示すように視感度補正フィルタは、5枚のフィルタにオパールガラス1枚を組み合せる。光電管の場合と同様にフィルタは研磨などによる分光透過特性の調整は行わず、市販のカatalog規格品をそのまま使用した。いずれも容易に入手可能なフィルタである。

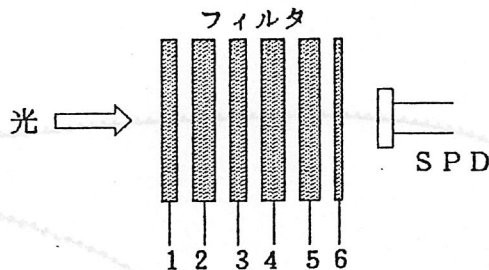


図4. 1. 1-8 (シリコンフォトダイオードと補正フィルタの組み合わせ)

表4. 1. 1-7 (フィルタの名称と板厚)

	フィルタの名称	板厚(mm ^t)
1	オパールガラス	2.02
2	コーニング CS 3-77	3.10
3	コーニング CS 3-73	2.03
4	東芝ガラス IRA-20	2.99
5	HOYA LA 20	2.69
6	ショット BG 18	1.00

赤外感度の高いシリコンフォトダイオードを受光器に用いる場合は、赤外線吸収フィルタを組み入れることが必要になる。また、フィルタによっては入射光の励起で蛍光を発するものもあるので、フィルタの組み合わせ順番や光電素子をフィルタに必要以上に近接させないなどの配慮も必要になる。

補正フィルタは図4. 1. 1-8の順番で組み合わせ、各フィルタ間は約 1mm の間隔を設け、BG 18フィルタとシリコンフォトダイオード受光面との間は約 5mm 離してある。

各フィルタの分光透過特性(380 nm ~ 780 nm)を図4. 1. 1-9に、また各フィルタ組み合わせ時の相対分光透過特性を標準比視感度特性 $V(\lambda)$ に対比させて図4. 1. 1-10に示す。

シリコンフォトダイオードの分光応答度は一定でないものの同一形名であれば素子個々によるばらつきは小さいため、比較的近似した視感度補正特性が得られる。

S1337-1010BRおよびS1723-04の相対分光応答度(380 ~ 780 nm)と視感度補正フィルタの相対分光透過特性を対比させて図4. 1. 1-11に示す。また、S1337-1010BRとS1723-04に視感度補正フィルタを組み合わせた場合の相対分光応答度を図4. 1. 1-12および図4. 1. 1-13に標準比視感度特性 $V(\lambda)$ に対比させて示す。

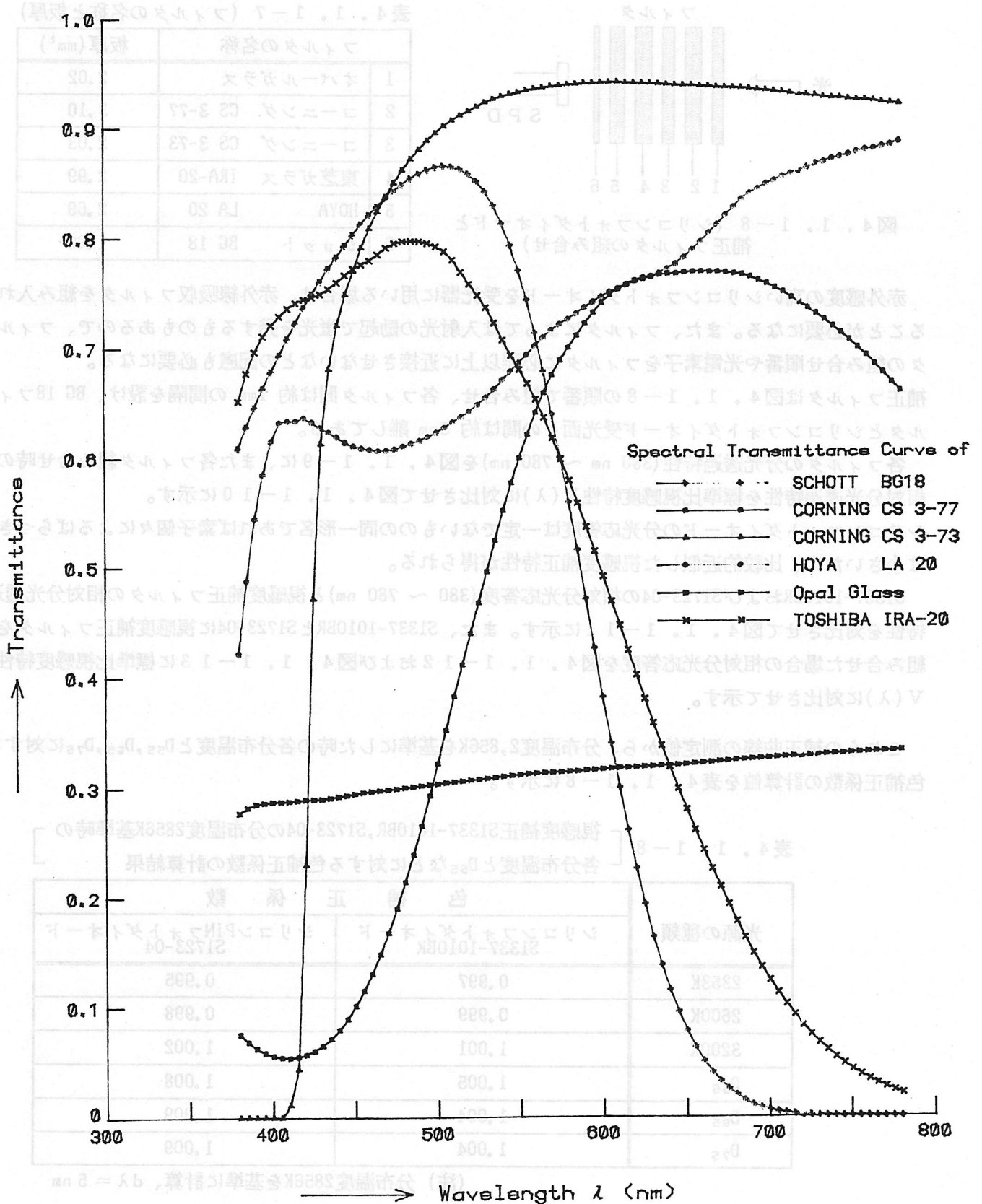
これらの補正曲線の測定値から、分布温度2,856Kを基準にした時の各分布温度と D_{55} , D_{65} , D_{75} に対する色補正係数の計算値を表4. 1. 1-8に示す。

表4. 1. 1-8 [視感度補正S1337-1010BR, S1723-04の分布温度2856K基準時の各分布温度と D_{55} などに対する色補正係数の計算結果]

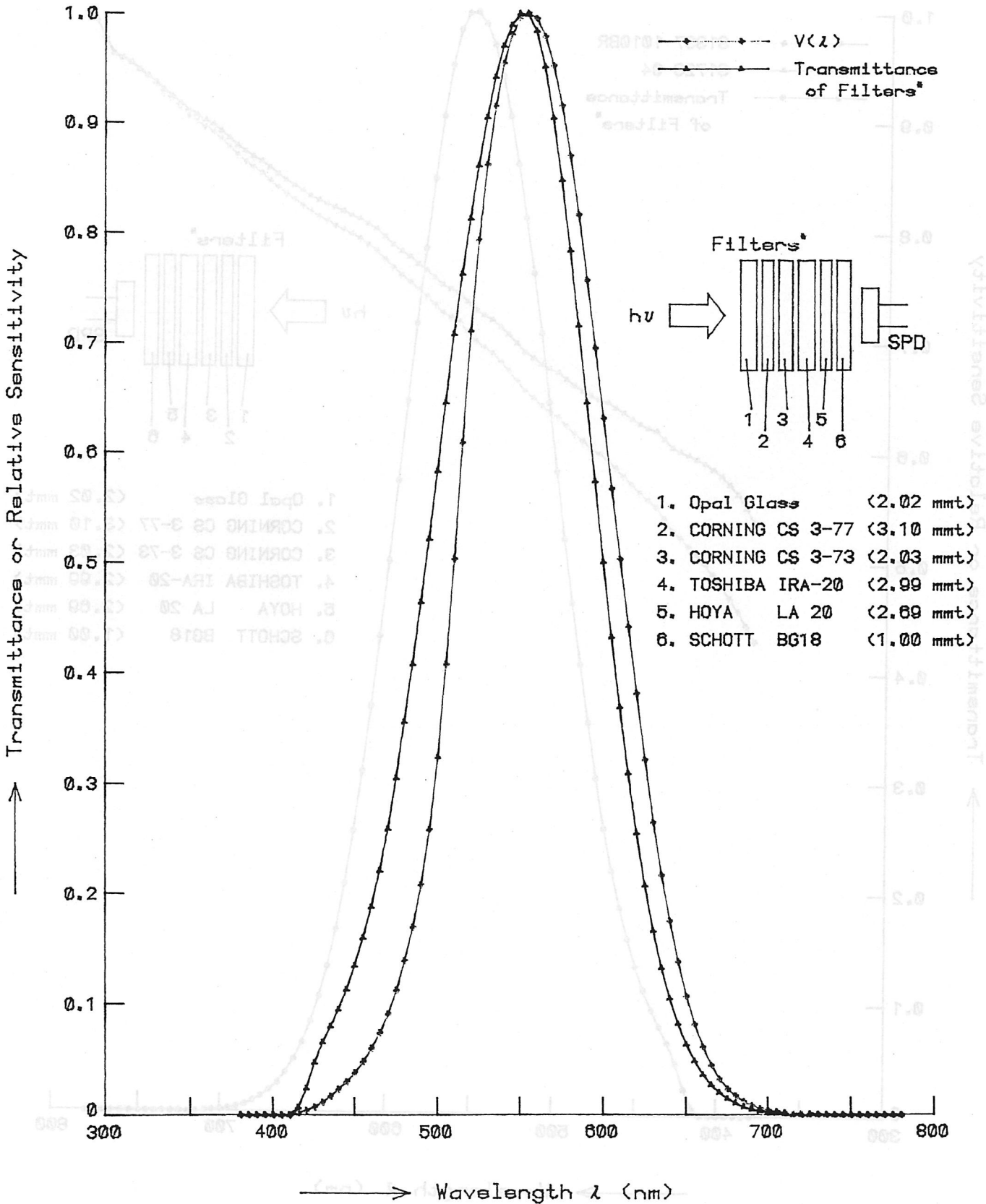
光源の種類	色 補 正 係 数	
	シリコンフォトダイオード S1337-1010BR	シリコンPINフォトダイオード S1723-04
2353K	0.997	0.995
2600K	0.999	0.998
3200K	1.001	1.002
D_{55}	1.005	1.008
D_{65}	1.004	1.009
D_{75}	1.004	1.009

(注) 分布温度2856Kを基準に計算、 $d\lambda = 5 \text{ nm}$

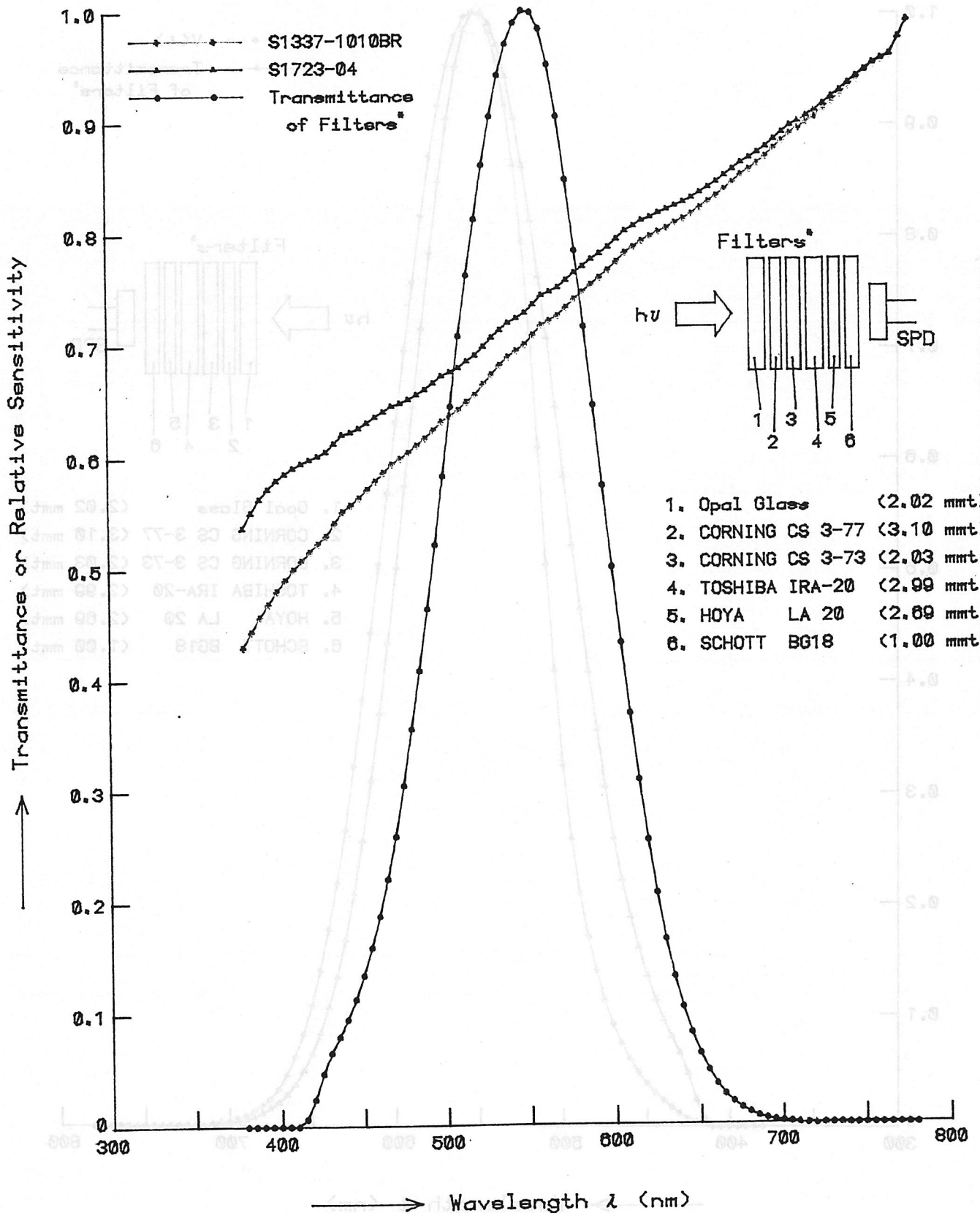
Spectral Transmittance Curves of Opal Glass,
SCHOTT BG18, CORNING CS 3-77, CS 3-73,
HOYA LA 20 and TOSHIBA IRA-20 Filters



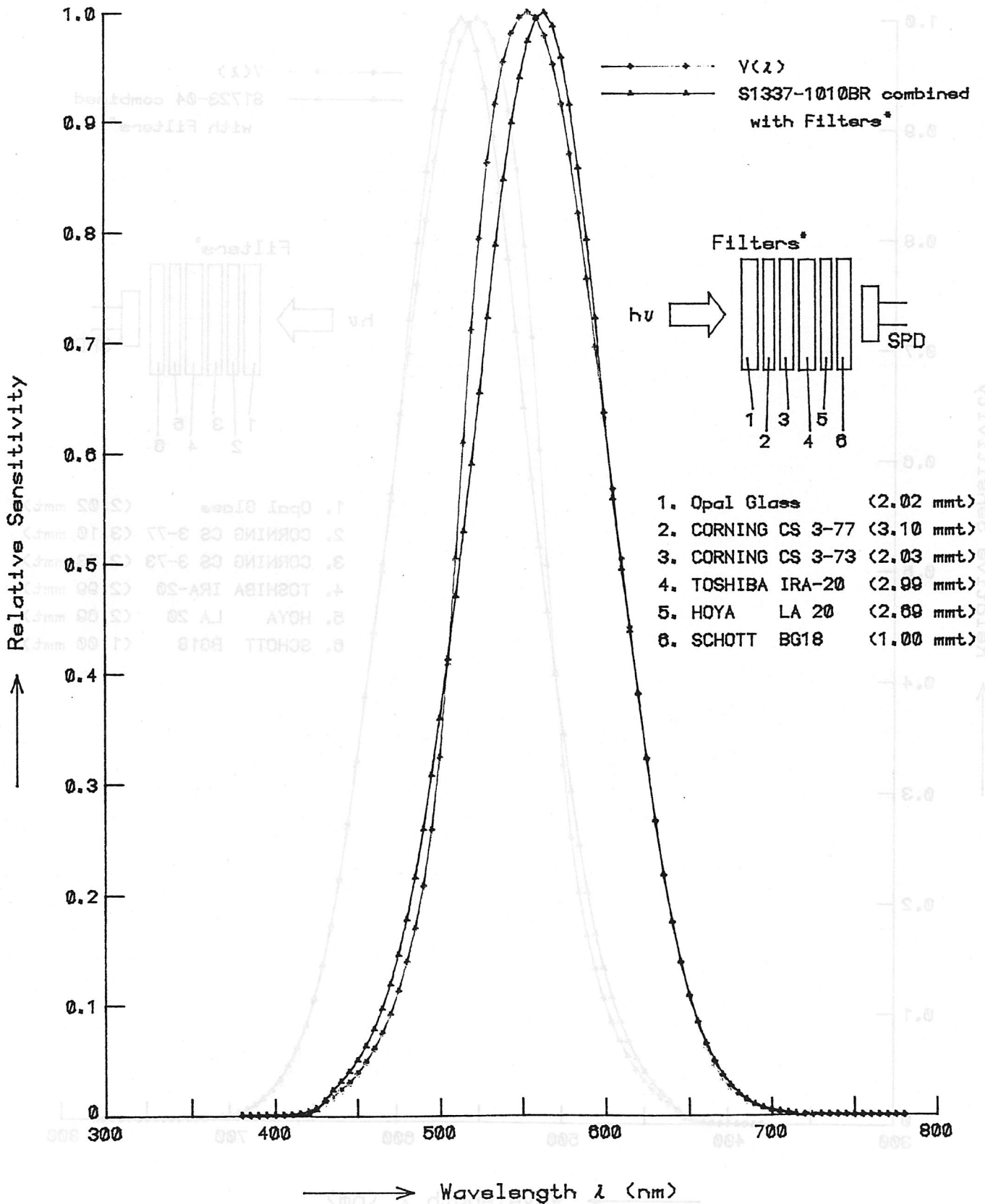
Relative Spectral Luminous Efficiency $V(\lambda)$ Curve
of Photometric Standard Observer
and Spectral Transmittance Curve of Filters*



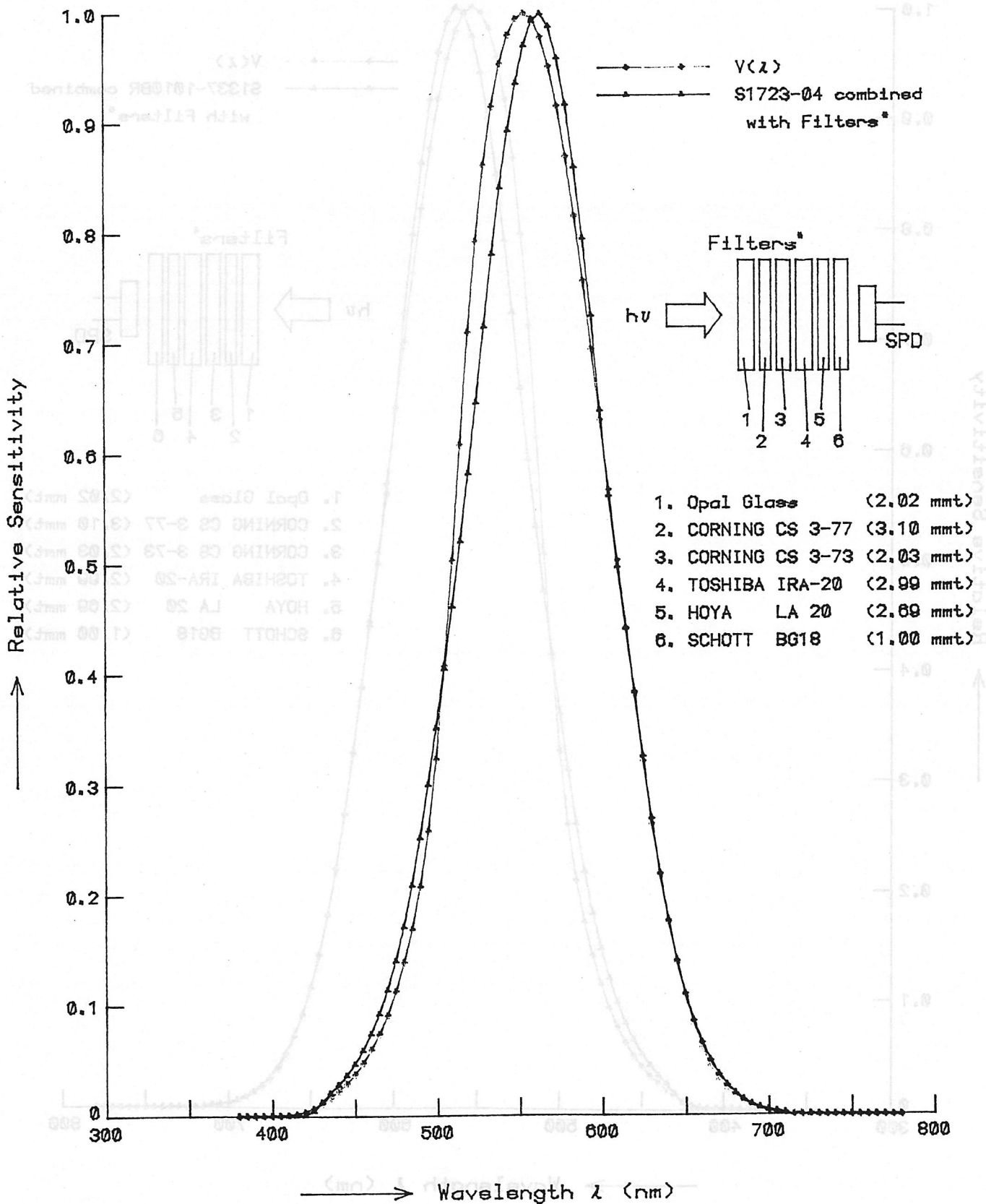
Relative Spectral Transmittance of Filters*
and Relative Spectral Response Curves
of HAMAMATSU S1337-1010BR, S1723-04 SPD



Relative Spectral Luminous Efficiency $V(\lambda)$ Curve
of Photometric Standard Observer
and Relative Spectral Response Curve
of HAMAMATSU S1337-1010BR SPD combined with Filters*



Relative Spectral Luminous Efficiency $V(\lambda)$ Curve
of Photometric Standard Observer
and Relative Spectral Response Curve
of HAMAMATSU S1723-04 SPD combined with Filters*



4.1.2 電子回路

キセノンフラッシュランプの放射するせん光は第2章で述べられているように発光時間幅は数十 μ s～数msであり、しかも放射束の時間的変化も大きいので、ピーク放射束は極めて高出力なものとなる。したがって、測光器を構成する受光素子や電子部品は広いダイナミックレンジと広い周波数帯域を有するものを選択して使用しなければならない。

4.1.2-1 非反転増幅器を用いる場合

図(4.1.2-1)は受光器光電流を直接コンデンサに流し、発光終了後のコンデンサ両端電圧を測定することによって光束の時間積分である光量を測定する回路を示したものである。ただし、図4.1.2-1は受光器としてPINホトダイオードを用いる場合、図4.1.2-2は光電管の場合である。出力電圧の極性が異なる他、動作はいずれも同様であるから、図4.1.2-1を例に述べる。いま、スイッチ S_2 を開いた状態でスイッチ S_1 を閉じ、コンデンサ C_1 の電荷を放電させると、このとき、演算増幅器(OPA₁)¹⁾によって構成されたバッファ増幅器(インピーダンス変換器とも言う)の出力電圧 V_o には、オフセット電圧 V_{os} が生ずるので、一般にはここで、 V_{R_1} によりオフセット調整を行い V_o を0Vにする。キセノン・フラッシュランプの光量を測定する場合のように、測定時間が十分短い場合は、オフセット電圧の短時間ドリフトのみが関係するので、測定の都度0調整を行えば、オフセット電圧の影響は十分除去できたと考えてよい。また、スイッチ S_1 を閉じたときの出力電圧 V_o を記録し、これを測定後の出力から差し引いてやれば、いちいちオフセット調整をしなくとも差し支えない。次に S_1 を開いてもコンデンサ C_1 には電荷がすぐに溜らないので、入力バイアス電流の十分小さい(0.1nA以下)演算増幅器(入力差動対がMOSFETやJFETのもの)でバッファ増幅器を構成していれば、その出力電圧 V_o は S_1 を閉じていたときと同じ出力を示している。ここで S_2 を閉じ、つづいて受光器P.D.にキセノン・フラッシュランプの放射束が入射すると、バッファ増幅器の入力電圧 V_i は受光器出力電流が $I(t)$ のとき

$$V_i = (1/C_1) \int_0^{t_f} I(t) dt \quad \text{--- (4.1.2-1)}$$

ただし、 t_f : キセノン・フラッシュランプの発光時間。

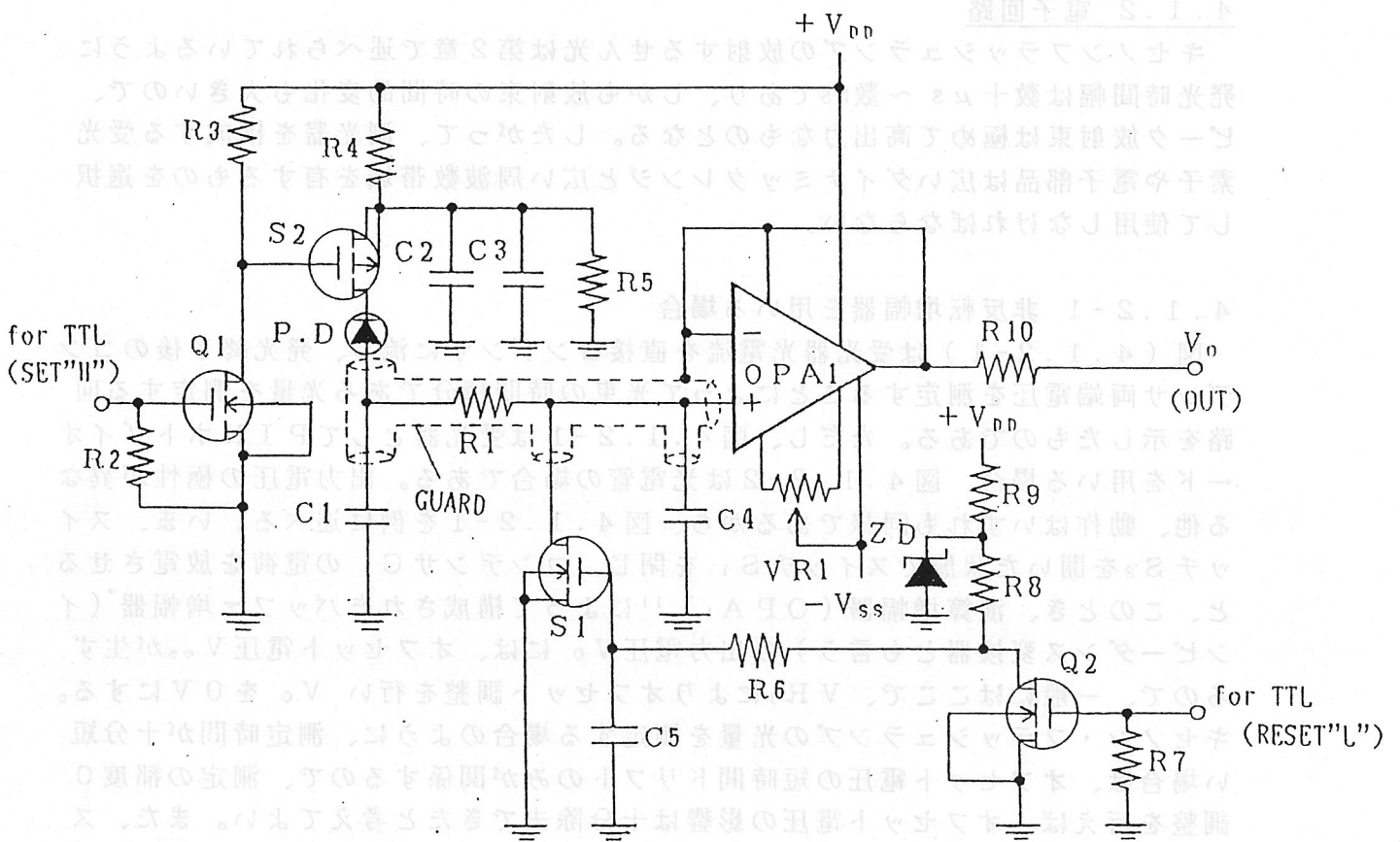
となる。しかし、受光器は光電流以外に暗電流 I_D が流れ、この I_D は環境温度やバイアス電圧によって異なるので、これを $I_D(\theta, V_B)$ と記述すると現実には

$$V_i = (1/C_1) \int_0^{t_m} \{ I_L(t) + I_D(\theta, V_B) \} dt \quad \text{--- (4.1.2-2)}$$

ただし、 $I_L(t)$: 光電流で、 $I_L(t) = I(t) - I_D(\theta, V_B)$

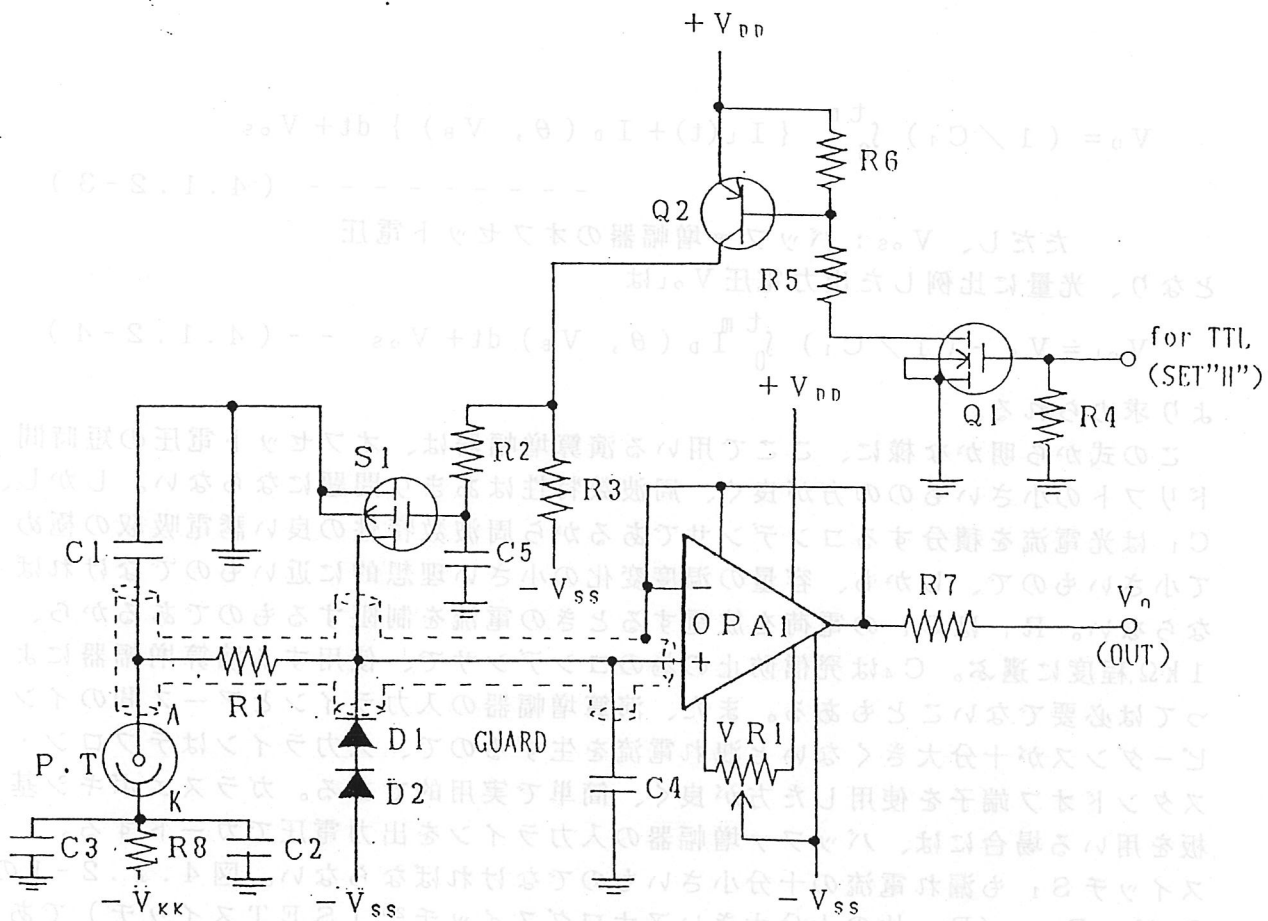
t_m : S_2 を閉じてから出力 V_o の測定を終了するまでの時間、又は S_2 の閉じている時間で、 $t_m \geq t_f$

となる。したがって、バッファ増幅器の出力電圧 V_o は



- | | |
|-------------------------------------|--|
| $+V_{DD}$: +15V | C1 : 50nF~0.2 μ F (ホリカーホネット) |
| $-V_{SS}$: -15V | C2 : 47 μ F(タンタル) |
| R1 : 0.8~1k Ω | C3 : 0.1 μ F(セラミック) |
| R2 : 5.1k Ω | C4 : 2~5pF(OPA1にAD515, OPA111を使用する場合は不要) |
| R3 : 9.1k Ω | C5 : 0.02 μ F(セラミック) |
| R4 : 3.9k Ω | OPA1 : AD515(ANALOG DEVICES) |
| R5 : 11k Ω | OPA111SM(BURR BROWN) |
| R6 : 5.1k Ω | P.D : PINホトダイオード |
| R7 : 5.1k Ω | S1 : 3SK38A |
| R8 : 9.1k Ω | S2 : 3N163 or 3SJ11A |
| R9 : 1k Ω | Q1, Q2 : SD210(Siliconix) |
| R10 : 150 Ω (負荷インピーダンスにより決定) | ZD : RD11A |
| VR1 : 10k Ω | |
- (注: 許容オフセット電圧=1mVなら不要)

図4.1.2-1 非反転増幅器による光量測定用電子回路 (PINホトダイオードの場合)



- | | |
|----------------------------------|--|
| $+V_{DD}$: +15V | C1 : 100~300pF (200W.V:ホリカー-ホネート) |
| $-V_{SS}$: -15V | C2 : 0.1 μ F (200W.V:セラミック) |
| $-V_{KK}$: -90~-150V | C3 : 4.7 μ F (200W.V:ケミコン) |
| R1 : 10~30k Ω | C4 : 2~5pF (OPA1にAD515, OPA111を使用する場合は不要) |
| R2 : 5.1k Ω | C5 : 0.02 μ F (セラミック) |
| R3 : 9.1k Ω | OPA1 : AD515 (ANALOG DEVICES)
OPA111SM (BURR BROWN) |
| R4 : 5.1k Ω | P.T : 光電管 |
| R5 : 39k Ω | S1 : 3SJ11A or 3N163 (Siliconix) |
| R6 : 8.1k Ω | Q1 : SD210 (Siliconix) |
| R7 : 150 Ω (出力負荷抵抗によって決定) | Q2 : スイッチング用トランジスタ |
| R8 : 20k Ω | D1, D2 : 1S1544A \times 2 or DPAD5 (Siliconix) |
| VR1 : 10k Ω | |
- (注: 許容オフセット電圧=1mVなら不要)

図4.1.2-2 非反転増幅器による光量測定用電子回路 (光電管の場合)

$$V_o = (1/C_1) \int_0^{t_m} \{ I_L(t) + I_D(\theta, V_B) \} dt + V_{os} \quad (4.1.2-3)$$

ただし、 V_{os} : バッファ増幅器のオフセット電圧
となり、光量に比例した出力電圧 V_{oL} は

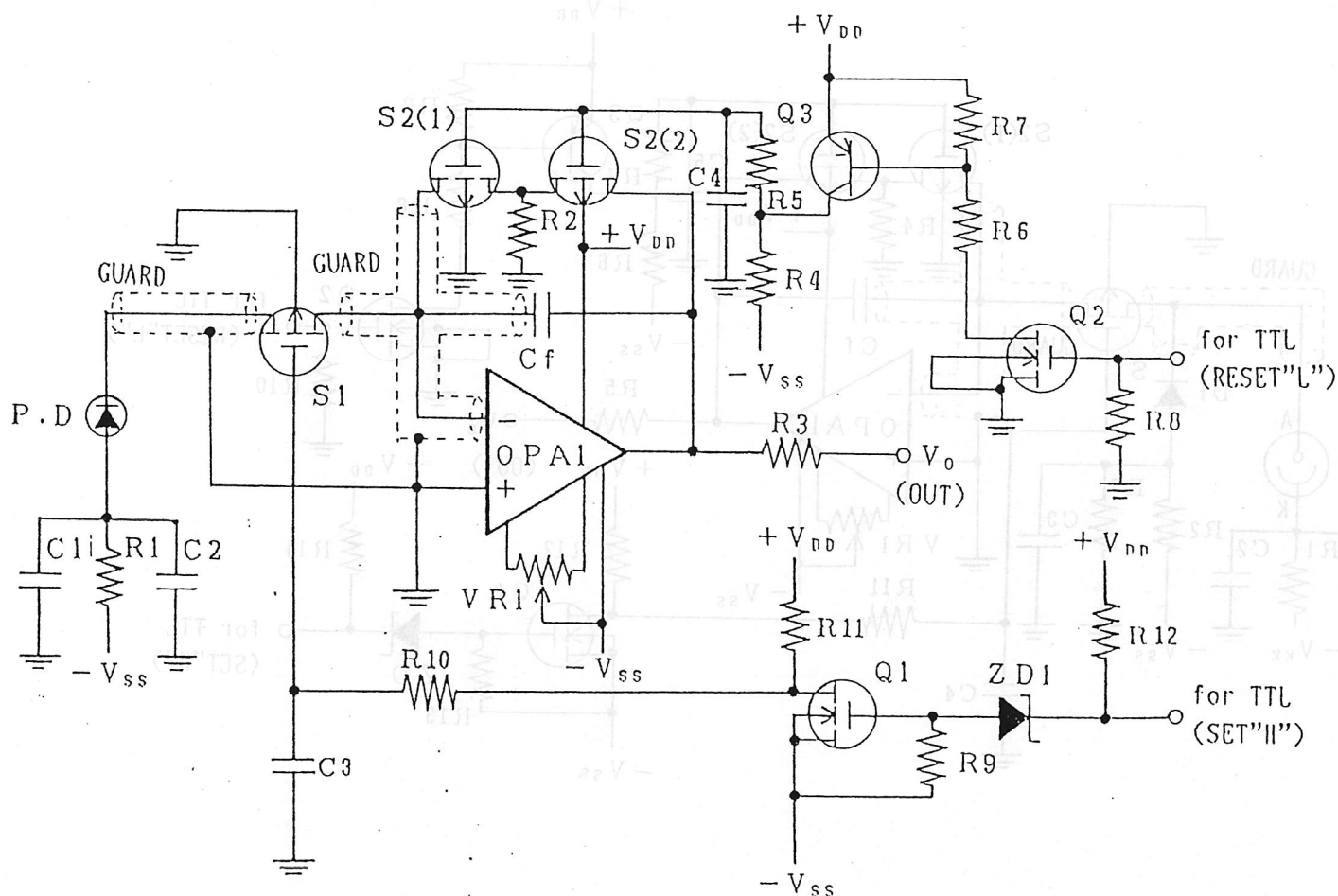
$$V_{oL} \doteq V_o - (1/C_1) \int_0^{t_m} I_D(\theta, V_E) dt + V_{os} \quad (4.1.2-4)$$

より求められる。

この式から明かな様に、ここで用いる演算増幅器は、オフセット電圧の短時間ドリフトの小さいものの方が良く、周波数特性はあまり問題にならない。しかし、 C_1 は光電流を積分するコンデンサであるから周波数特性の良い誘電吸収の極めて小さいもので、しかも、容量の温度変化の小さい理想的に近いものでなければならない。 R_1 は C_1 の電荷を放電するときの電流を制限するものであるから、 $1\text{ k}\Omega$ 程度に選ぶ。 C_4 は発信防止の為のコンデンサで、使用する演算増幅器によっては必要でないこともある。また、演算増幅器の入力ラインとアース間のインピーダンスが十分大きくないと洩れ電流を生ずるので、入力ラインはテフロン・スタンドオフ端子を使用した方が良く、簡単で実用的である。ガラスエポキシ基板を用いる場合には、バッファ増幅器の入力ラインを出力電圧でガードする。スイッチ S_1 も漏れ電流の十分小さいものでなければならない。図 4.1.2-1 の S_2 は、 R_{off}/R_{on} 比の十分大きいアナログスイッチ²⁾ (SET スイッチ) である。なお、図 4.1.2-2 の場合には図 4.1.2-1 のように光電流を遮断する SET スイッチを設けるのが難しいので、測定に当たっては、基準光もまた一定時間幅のパルスでなければならない。また、図 4.1.2-2 のダイオード D_1, D_2 は S_1 の OFF のときのドレイン・ソース間電圧が過大に成らない様にするための保護用で、逆方向電流が $0.1\text{ nA}/1\text{ V}$ 以下のものを選択する。

4.1.2-2 積分回路を用いる場合^{3)~6)}

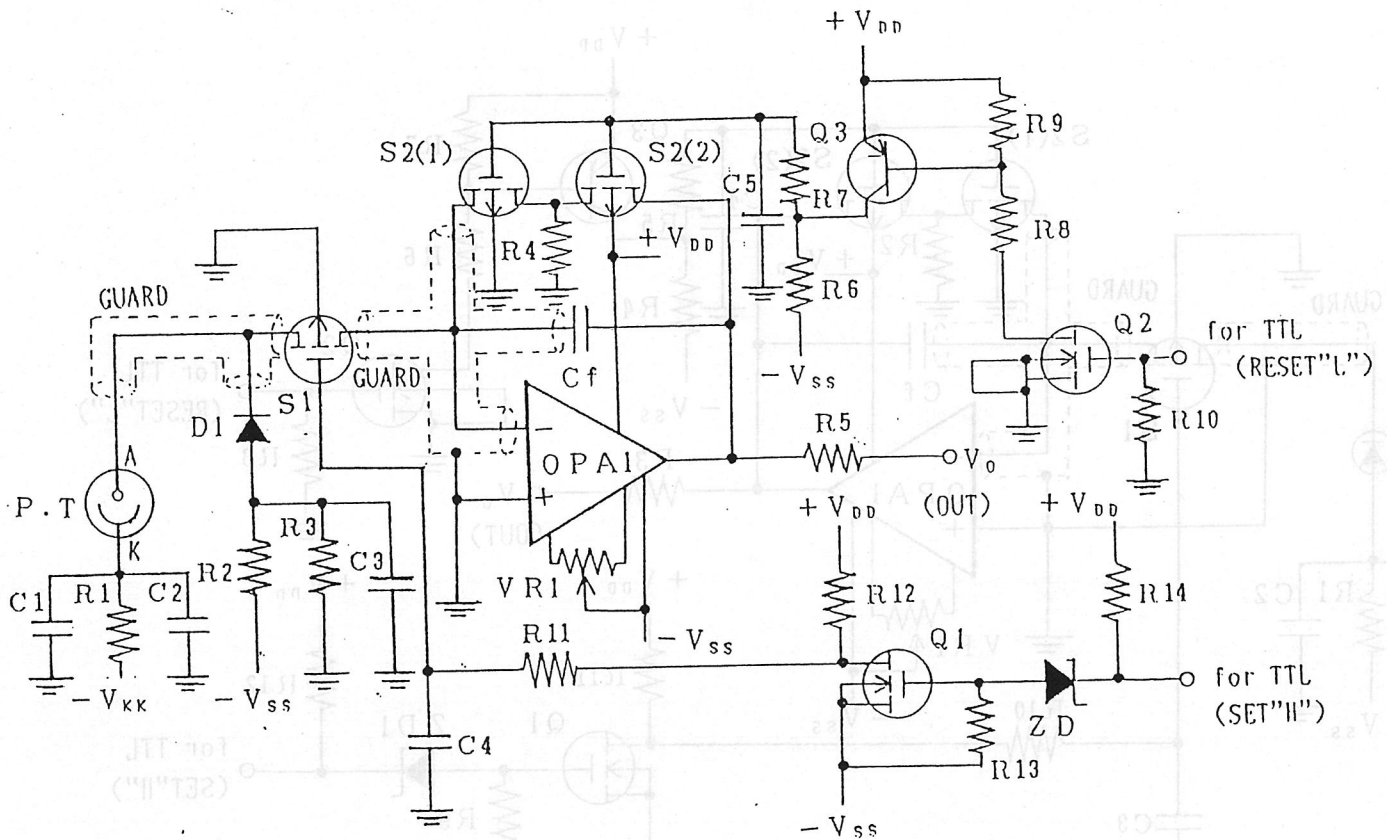
図 4.1.2-3 及び図 4.1.2-4 は、いずれも演算増幅器の帰還回路にコンデンサを用いた、いわゆる積分回路である。図 4.1.2-3 は受光器に PIN ホトダイオードを用いる場合、図 4.1.2-4 は光電管の場合である。図 4.1.2-3 において、スイッチ S_1 を OFF、 S_2 を ON にしたとき、受光器 P.D の出力電流は積分器から遮断され、コンデンサ C_1 の電荷は放電し、演算増幅器 (OPA1) の反転入力端 (-) の電圧 e_g は出力電圧 V_o と等しくなる。ここでオフセット調整用 VR_1 により、 $V_o = 0\text{ V}$ にした後、 S_2 を開き、積分器として動作させるようにすれば、この時、 e_g と V_o はコンデンサ C_1 によって接続されており、演算増幅器の入力のバイアス電流 I_E と S_1, S_2 の洩れ電流が十分に小さく 0.1 nA 以下であれば、 C_1 にほとんど電流は流れないので、 $e_g = V_o = 0\text{ V}$ が維持される。続いて S_1 を ON させると、受光器は電流源と見なせるので、その出力電流 $I(t)$ はコンデンサ C_1 に流れ、電荷が蓄積される。したがって、演算増幅器の閉ループ利得が大きく、且つ、その周波数特性が $I_L(t)$ のもつ周波数帯域より広い範囲で



- | | | | |
|-----------|-------------------------------|--------------|---|
| $+V_{DD}$ | : +15V | C1 | : 47 μ F (tantalum) |
| $-V_{SS}$ | : -15V | C2 | : 0.1 μ F (ceramic) |
| R1 | : 2k Ω | C3 | : 0.01 μ F (ceramic) |
| R2 | : 15k Ω | C4 | : 0.01 μ F (ceramic) |
| R3 | : 150 Ω (出力負荷抵抗によって決定) | Cf | : 50nF ~ 0.2 μ F (ポリカーボネート) |
| R4 | : 15k Ω | OPA1 | : AD515 (ANALOG DEVICES)
OPA111SM (BURR BROWN) |
| R5 | : 10k Ω | P.D | : PINホトダイオード |
| R6 | : 39k Ω | S1 | : 3SJ11A or 3N163 (Siliconix) |
| R7 | : 8.1k Ω | S2(1), S2(2) | : 3SJ11A or 3N163 \times 2 |
| R8 | : 5.1k Ω | Q1, Q2 | : SD210 (Siliconix) |
| R9 | : 1.5k Ω | Q3 | : スイッチング トランジスタ |
| R10 | : 10k Ω | ZD1 | : MA1160 (V _Z +1V) |
| R11 | : 15k Ω | | |
| R12 | : 3k Ω | | |
| VR1 | : 10k Ω | | |

(注: 許容オフセット電圧 = 1mV なら不要)

図 4. 1. 2-3 積分回路による光量測定用電子回路 (PINホトダイオードの場合)



- | | | | |
|-----------|-------------------------------|--------------|---|
| $+V_{DD}$ | : +15V | C1 | : 4.7 μ F (200W.V:ケミコン) |
| $-V_{SS}$ | : -15V | C2 | : 0.1 μ F (200W.V:セラミック) |
| $-V_{KK}$ | : -90~-150V | C3 | : 47 μ F (タンタル) |
| R1 | : 20k Ω | C4 | : 0.01 μ F (セラミック) |
| R2 | : 30k Ω | C5 | : 0.01 μ F (セラミック) |
| R3 | : 2.5k Ω | Cf | : 100pF~300pF (ホリカーホネート) |
| R4 | : 15k Ω | OPA1 | : AD515 (ANALOG DEVICES) |
| R5 | : 150 Ω (出力負荷抵抗によって決定) | | OPA111SM (BURR BROWN) |
| R6 | : 15k Ω | P.T | : 光電管 |
| R7 | : 10k Ω | S1 | : 3SJ11A or 3N163 (Siliconix) |
| R8 | : 39k Ω | S2(1), S2(2) | : 3SJ11A \times 2 or 3N163 \times 2 |
| R9 | : 8.1k Ω | Q1, Q2 | : SD210 (Siliconix) |
| R10 | : 5.1k Ω | Q3 | : スイッチング用トランジスタ |
| R11 | : 10k Ω | D1 | : 1S1544A |
| R12 | : 15k Ω | ZD1 | : MA1160 ($ V_{SS} + 1V$) |
| R13 | : 1.5k Ω | | |
| R14 | : 3.1k Ω | | |
| VR1 | : 10k Ω | | |

(注: 許容オフセット電圧 = 1mV なら不要)

図 4. 1. 2-4 積分回路による光量測定用電子回路 (光電管の場合)

十分な特性を有しているとき、出力電圧 V_o は、

$$V_o = (1/C_f) \int_0^{t_m} I(t) dt \quad \text{--- (4.1.2-5)}$$

ただし、 $I(t)$ は受光器側に流れる方向

となり、受光器出力電流の時間積分に比例する。しかし、実際の測定では、オフセット調整を測定の都度行うこともできず、且つ、受光器の出力電流には光電流 $I_L(t)$ の他に暗電流 $I_D(\theta, V_B)$ も存在するので、せん光の光量を測定する場合には、オフセット電圧や暗電流による出力を予め求めておきこれを差し引くといった方法が採られる。 S_1 がOFFで、 S_2 がONのときの入力オフセット電圧を V_{os} とすると $V_o = V_{os}$ となり、出力電圧 V_o はオフセット電圧によって決まる。次に S_2 をOFFにしても C_f に電流が流れなければ、 V_o はこの V_{os} の電圧を維持している。ここで、 S_1 をONさせる。受光器に光が入射していない場合は、受光器出力電流は暗電流のみとなり、 t_m なる一定時間 S_1 をONした後の出力電圧 V_{od} は、

$$V_{od} = (1/C_f) \int_0^{t_m} I_D(\theta, V_B) dt + V_{os} \quad \text{--- (4.1.2-6)}$$

となり、 $I_D(\theta, V_B) = I_D$ で一定（受光器のバイアス電圧 V_B が一定なので暗電流も一定）のときの出力 V_{od} は

$$V_{od} = (1/C_f) I_D \cdot t_m + V_{os} \quad \text{--- (4.1.2-7)}$$

である。また、 S_2 をOFFし、 S_1 のONしている時間 t_m の間に、せん光を発生させれば、そのときの出力電圧 V_o は

$$\begin{aligned} V_o &= (1/C_f) \int_0^{t_m} (I_L(t) + I_D) dt + V_{os} \\ &= (1/C_f) \int_0^{t_m} I_L(t) dt + V_{od} \quad \text{--- (4.1.2-8)} \end{aligned}$$

ただし、 t_m : S_1 をONしている時間で、 $t_m \gg t_f$

となる。従って、せん光の光量に比例した出力電圧 V_{oL} は (4.1.2-9) 式より求められる。

$$V_{oL} = V_o - V_{od} \quad \text{--- (4.1.2-9)}$$

しかし、出力電圧を飽和させる入力信号は避けなければならない。

また、図4.1.2-4のダイオード D_1 は、 S_1 をOFFしたとき、ドレイン・ソース間の電圧が大きくなるようにするためのもので、逆方向電流が $0.1 \text{ nA} / 1 \text{ V}$ 以下のものを選択する。 S_2 は洩れ電流の小さいアナログスイッチである。

以上、コンデンサ方法によりせん光の光量を測定する電子回路（レベル変換器）について記述したが、この様な電子回路の作成に当たっては、演算増幅器の入力端子の漏れ電流を極力小さくする配慮が必要である。テフロンソケットやテフロンスタンドオフ端子の使用をすすめるが、ガラス・エポキシ基板で作る場合は、この端子を囲む様にガードリングを設ける。また、完成した回路をTMCフレオンや高純度のメタノールなどの溶剤で十分洗浄し、さらに脱イオン水で洗い、窒素乾燥するとよい。湿度の高い環境で使用する場合は、Kel-F やテフロンの絶縁コーティングをした方がよく。回路全体を金属ケースに収め、共通GROUNDにして、シールドすることも忘れてはならない。

参考文献

- 1)ANALOG DEVICES: DATA-ACQUISITION
- 2)Siliconix: FET DATA BOOK
- 3)近藤他: せん光露光量計 光学第1巻4号(8月) pp202~211, 1972
- 4)石井他: Xeフラッシュランプの全放射エネルギー測定 昭和46年電気学会全国大会講演論文集 808 p1069, 1973
- 5)石井他: Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(II) 昭和49年電気学会全国大会講演論文集 142 1974
- 6)石井他: キセノン・フラッシュランプの放射エネルギー測定 電気学会論文誌A Vol.97 No.6 pp26~30, 1977

4.2 波形解析方法

4.2.1 光電素子

4.2.1-1 分類と種類

測定目的から応答時間(Response time)に優れた特性の光電素子が基本的に要求される。

また、取り扱いが簡便なことなどの測光用光電素子が具備すべき諸条件〔4.1.1-1 『分類と種類』の項参照〕から、シリコンPINフォトダイオードが最適な種類と考えられる。

まず、表4.2.1-1に主な光検出素子の応答時間(立ち上がり時間)の目安を示す。

表4.2.1-1 (主な光検出素子の応答時間)¹⁻⁶

分類		種類	立ち上がり時間(s)		
熱型検出素子	サーモカップル, サーモパイル ボロメータ, サーミスタ		10 ⁻²		
			5×10 ⁻³		
	ニューマチックセル 焦電型検出素子	ゴーレイセル	5×10 ⁻⁴		
		コンデンサマイクロホン	4×10 ⁻²		
量子型検出素子	内部光電効果型 検出素子	真性型	CdS	10 ⁻²	
			CdSe	10 ⁻²	
			PbS	2×10 ⁻⁴	
			PbSe	5×10 ⁻⁶	
			HgCdTe	10 ⁻⁶	
	外部光電効果型 検出素子	不純物型	Ge: Au, Ge: Hg,	5×10 ⁻⁸	
			Ge: Cu, Ge: Zn,		
			Si: Ga, Si: As		
			InAs		10 ⁻⁶
			InSb		10 ⁻⁶
光起電力型検出素子		HgCdTe	5×10 ⁻⁹		
		シリコンフォトダイオード	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁷		
		シリコンPINフォトダイオード	10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁹		
		GaAsPフォトダイオード	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁷		
		GaPフォトダイオード	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶		
		シリコン	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰		
		アバランシェフォトダイオード			
外部光電効果型 検出素子	光電管		10 ⁻⁹		
		バイプラナ光電管	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹¹		
		光電子増倍管	10 ⁻⁹		

—参考文献および参照カタログ・技術資料—

- (1) 鈴木佐喜雄編 オプトエレクトロニクスデバイス応用技術近代図書(昭62.1)50~105頁
- (2) 浜松ホトニクス 技術資料『赤外線検出素子の特性と応用』(1987年10月)
- (3) 浜松ホトニクス CdS光導電セルカタログ(1987年2月)
- (4) 浜松ホトニクス フォトダイオードカタログ(1987年4月)
- (5) 浜松ホトニクス 光電管カタログ(1984年9月)
- (6) 浜松ホトニクス 光電子増倍管カタログ(1988年1月)

表4.2.1-1から熱型検出素子は応答時間が大きく、特に焦電型素子は約1Hzをピークとして、その前後の周波数域で相対感度が低下するため、出力信号の波形が入射光の周波数成分で変わるなど波長依存性のない利点があるものの不適當であり、量子型検出素子が本測定目的用光電素子として適當である。

さらに量子型検出素子の外部光電効果型検出素子（バイプラナ光電管，光電子増倍管）と内部光電効果型検出素子（光起電力型検出素子）が測定目的に合う光電素子の種類として考えられるが、前者は高電圧電源を必要とするなど取り扱い方法においてやや特殊になるため、後者が本測定目的の光電素子として適當な種類と判断できる。

また、後者のうちシリコンアバランシェフォトダイオードは応答時間に優れているが、素子自身がアバランシェ現象によるキャリア（電子と正孔）増倍機構を有しており、この増倍率の温度依存性が大きいことなどの特性によって動作法がやや特殊になるため本測定目的の光電素子から外し、高速応答性をもつ光電素子としてシリコンフォトダイオードとシリコンPINフォトダイオードを選び、メーカーカタログ記載値から形名と立ち上がり時間の代表値を表4.2.1-2に示す。

この表から、シリコンフォトダイオードの応答時間も良好であるが、シリコンPINフォトダイオードはさらに応答時間に優れ、本測定目的用の光電素子として最適當と結論できる。

表4.2.1-2 (シリコンフォトダイオードとシリコンPINフォトダイオードの応答時間)^{1,2}

種類	光電素子 メーカー名	形名	立ち上がり時間 代表値 (s)	測定条件 (T _a = 25℃)	
				V _R (V)	R _L (Ω)
シリコン フォト ダイオード	シャープ	BS112	20 × 10 ⁻⁶	0	1 k
		BS142	27 × 10 ⁻⁶		
		BS530UV	30 × 10 ⁻⁶		
		BS530G			
	浜松 ホトニクス	S1336	(0.1~3)	0	
		S1337 シリーズ			
シリコン PIN フォト ダイオード	シャープ	PD43PI	100 × 10 ⁻⁹	10	50
		PD45PI	140 × 10 ⁻⁹	5	
		PD50PI	80 × 10 ⁻⁹	30	
		PD80PI	200 × 10 ⁻⁹		
	浜松 ホトニクス	S1188-02	3 × 10 ⁻⁹	20	
		S1190	3 × 10 ⁻⁹		
		S1223	5 × 10 ⁻⁹		
		S1721	3 × 10 ⁻⁹	30	
		S1722	1 × 10 ⁻⁹	100	
		S1723-04	15 × 10 ⁻⁹	30	
		S1863	2 × 10 ⁻⁹	50	
	S2216-01	1 × 10 ⁻⁹	5		

— 参照カタログ・データブック —

(1) SHARP SEMICONDUCTORS DATA BOOK "OPTOELECTRONICS" (Apr. 1985)

(2) 浜松ホトニクス フォトダイオードカタログ (1987年4月)

4.2.1-2 時間応答性

シリコンPINフォトダイオードは光起電力型検出素子であるため、零バイアス方式 ($V_R = 0\text{ V}$) で動作させることができるが、時間応答性や入射光と出力電流の直線性の上限を向上させる目的で、図4.2.1-1のようにカソードKがアノードAに対して正の電位になる極性で逆バイアス電圧 V_R を印加し、バイアス電源のインピーダンスを下げるため、フォトダイオードに近接させてコンデンサCを接続する。抵抗Rは、デカップリング抵抗である。ただし過剰な逆バイアス電圧の印加は、暗電流の増加による雑音電流の増大とフォトダイオードの破損を招くので、仕様値内の適切な電圧 (必要最小限低い電圧) に設定する注意が必要である。

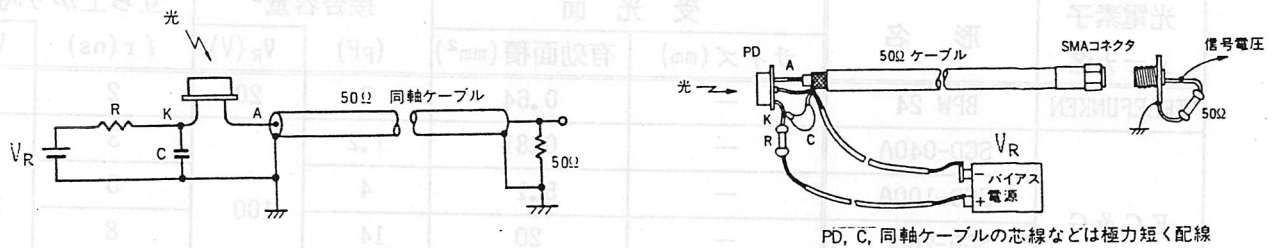


図4.2.1-1 (逆バイアス印加方法)

シリコンPINフォトダイオードの時間応答性は、光の照射によって有効受光面とその周辺で生成されたキャリアを電流信号として外部回路へどの程度の時間で取り出し得るかを示す値で、インパルス光を入射させた時に出力光電流波形の立ち上がり時間 t_r (または立ち下がり時間 t_f) で表し、出力光電流波形の 10% から 90% (または 90% から 10%) に達する時間で示される。

立ち上がり時間 t_r は、接合容量 C_j とパッケージのカソードとアノードリード端子間から見た分布容量 C_s の和、および内部直列抵抗 R_s (図4.1.1-1参照) と負荷抵抗 R_L の和の積で求まり、次式で示される。

$$t_r = 2.2 (C_s + C_j) (R_s + R_L) \quad \dots (4.2.1-1)$$

ただし、 $C_s \ll C_j$, $R_s \ll R_L$ の時

$$t_r = 2.2 C_j R_L \quad \dots (4.2.1-2)$$

この式から立ち上がり時間 t_r を小さくするには、外的要素の負荷抵抗 R_L を小さな値に設定することと、パッケージのリード端子間分布容量 C_s と接合容量 C_j および直列抵抗 R_s の小さなことが要求される。一般に接合容量 C_j は受光面積 A に比例し、逆バイアス電圧 V_R と基板材料の比抵抗 ρ の 2~3 乗根に逆比例し、次式で示される。

$$C_j \propto A \left[(V_R + 0.5) \rho \right]^{-\left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}\right)} \quad \dots (4.2.1-3)$$

以上の関係から、受光面積 A の小さい素子に逆バイアス電圧 V_R を印加し、接合容量 C_j を下げ、応答時間を改善させて使用する方法が採られる。

また、フォトダイオードでは有効受光面 (空乏層) 以外の周辺部に光を入射させると、この部分に生成するキャリアが拡散によって電極に達するまでに時間が掛り、尾引き現象が生じ立ち下がり時間 t_f を劣化させるが、シリコンPINフォトダイオードは、通常このような時間応答性を劣化させる特性要因を十分小さな値や構造となるように設計されている。

表4.2.1-3に光電素子メーカーの高速光用シリコンPINフォトダイオードの形名と接合容量(端子間容量)と立ち上がり時間 t_r の代表値をメーカー・カタログから転記して示す。

また、図4.2.1-2, 3にS1188-02とS2839の逆バイアス電圧 V_R をパラメータとした負荷抵抗 R_L と立ち上がり時間 t_r の関係を示す。この特性図から逆バイアス電圧 V_R は5~10Vdc程度に、また負荷抵抗 R_L は接続する増幅器や測定装置の入力インピーダンスと観測波形の立ち上がり時間などを考慮して、測定精度に影響の生じない十分低い値に設定する。

表4.2.1-3 (シリコンPINフォトダイオードの形名と特性値)¹ ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

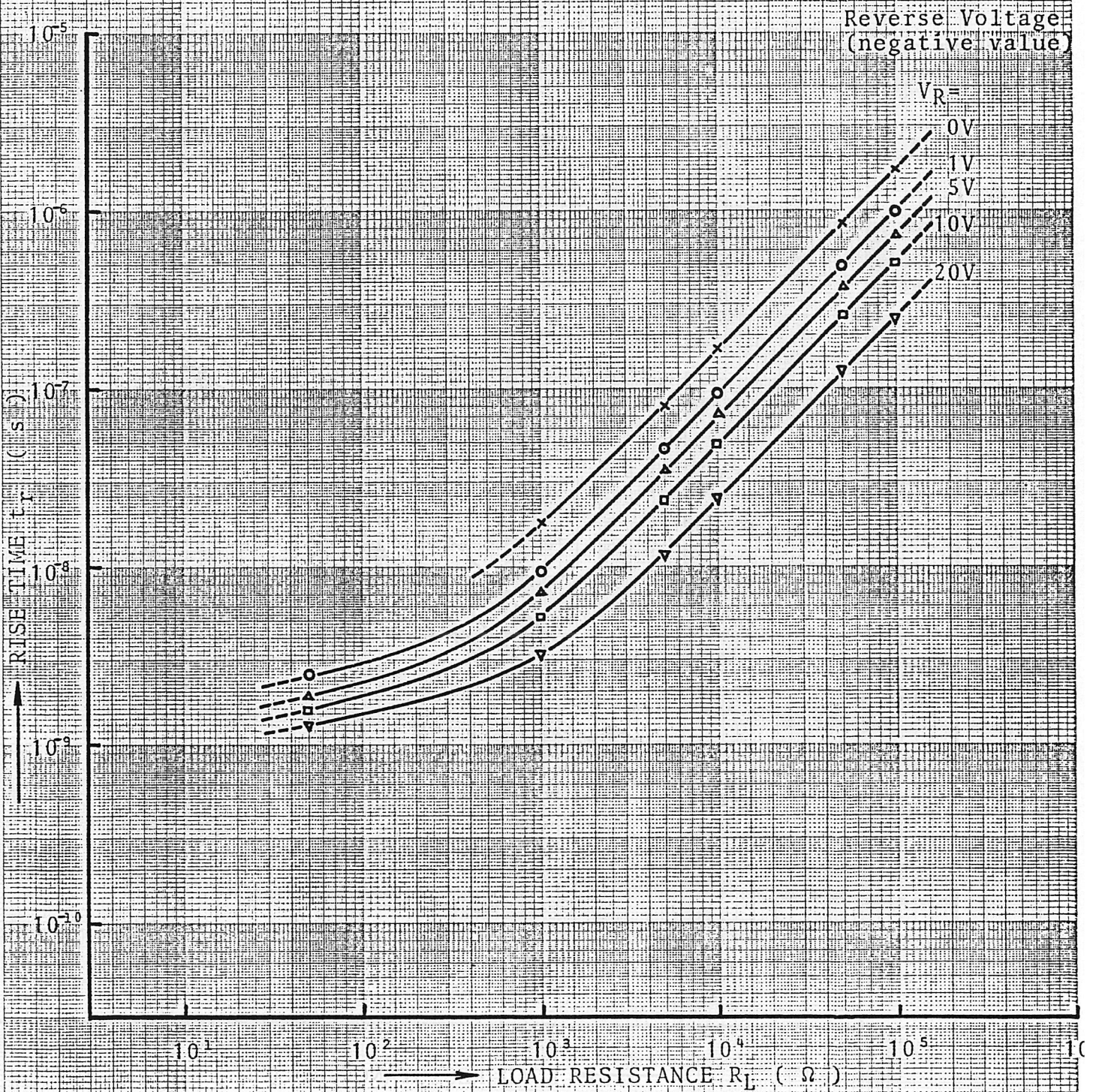
光電素子 メーカー名	形名	受光面		接合容量 ²		立ち上がり時間 ³	
		サイズ(mm)	有効面積(mm ²)	(pF)	V_R (V)	t_r (ns)	V_R (V)
TELEFUNKEN	BPW 24	—	0.64	6	20	2	20
E G & G	SGD-040A	—	0.81	1.2	100	3	100
	SGD-100A	—	5.1	4		5	
	SGD-200	—	20	14		8	
	SGD-444	—	100	70		10	
HEWLETT PACKARD ⁴	5082-4203	$\phi 0.508$	0.2	1.5	10	1	20
	5083-4204	$\phi 0.508$	0.2	2.0			
	5083-4205	$\phi 0.254$	0.3	0.7			
	5083-4207	$\phi 1.016$	0.8	5.5			
	5083-4220	$\phi 0.508$	0.2	2.0			
シャープ	PD50PI	—	0.96	15	30	40	30
	PD80PI	—	4.394	40		60	
U D T	PIN-020A,B	—	0.2	3	20	5	20
	PIN-040A,B	—	0.8	12			
浜松 ホトニクス	S1188-02	$\phi 0.8$	0.5	4	20	3	20
	S1188-06	$\phi 0.4$	0.12	2		0.8	
	S2216-01	$\phi 0.8$	0.5	2.5	5	1	5
	S2216-02	$\phi 0.4$	0.12	1.5			
	S1190	1.1×1.1	1.2	8	10	3	10
	S1223	2.4×2.8	6.6	13	20	5	20
						10	
	S1223-01	3.7×3.7	13.6	25	30	3	30
	S1721	$\phi 2.54$	5.1	8	30	3	30
	S1722	$\phi 4.1$	13.2	12	100	1	100
	S1863	$\phi 5.0$	19.6	17	50	2	50
	S1723	10×10	100	70	30	15	30
	S2839	$\phi 0.4$	0.12	2	5	0.5	5
S2840	$\phi 0.8$	0.5	4	0.6			

- (注) (1) 参照カタログ(データブック)は表4.1.1-1に同じ。
但し、S2839, S2840は個別カタログ(1987年9月)による。
(2) 接合容量 C_j または端子間容量 C_t の代表値、但しHPは最大値。
(3) 負荷抵抗 $R_L = 50\Omega$ 時の代表値、但しHP, UDTは最大値。
(4) HEWLETT PACKARD PIN PHOTODIODE HP5082-4200 series catalogue

4.2.1-2

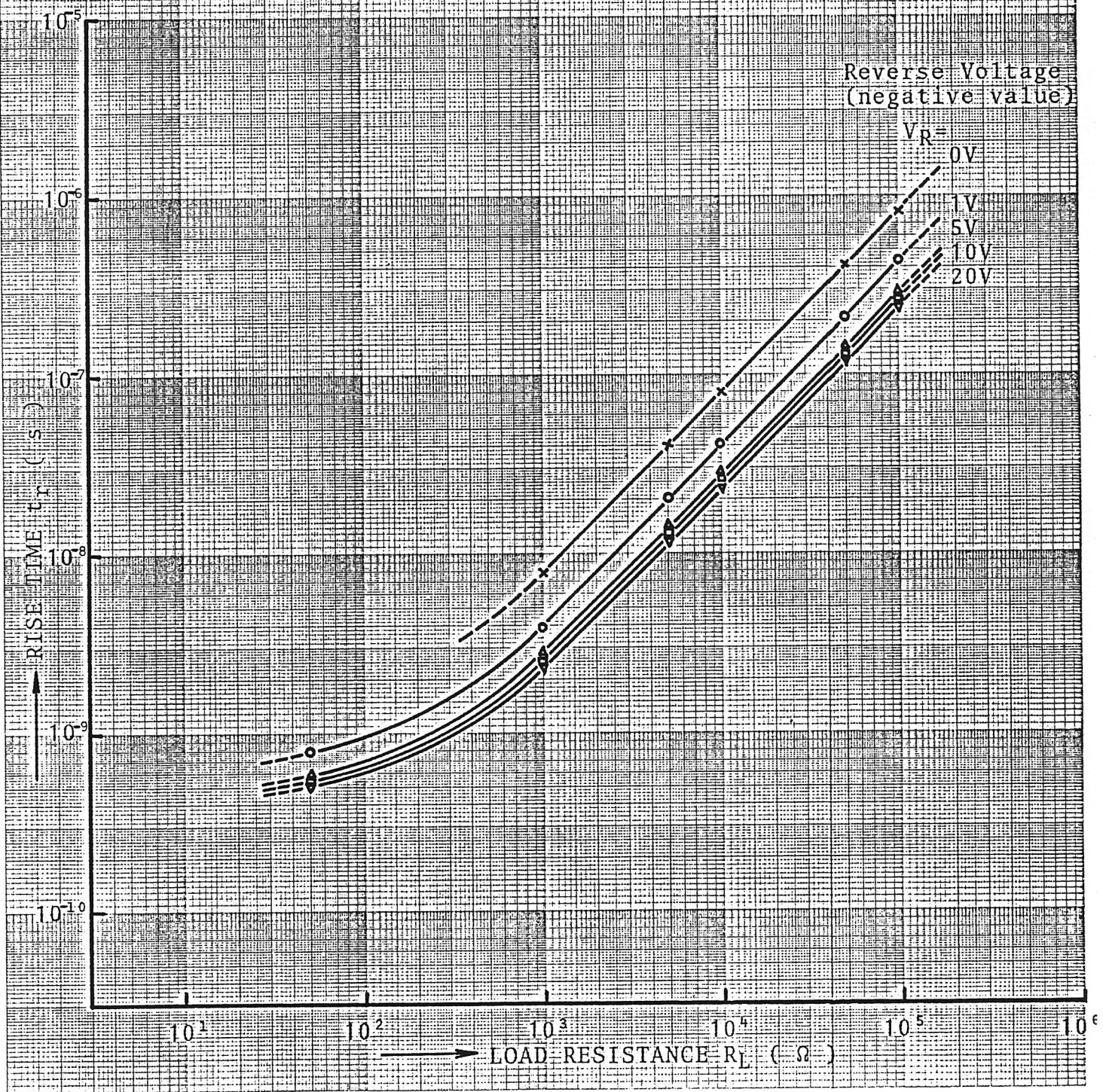
HAMAMATSU S1188-02 PIN-SILICON PHOTODIODE

RISE TIME t_r CHANGES AS A FUNCTION OF LOAD RESISTANCE R_L ($T_a=25^\circ\text{C}$)



4.2.1-3

HAMAMATSU S2839 PIN SILICON PHOTODIODE
RISE TIME t_r CHANGES AS A FUNCTION
OF LOAD RESISTANCE R_L ($T_a=25^\circ\text{C}$)



4.2.2 電子回路

Xeフラッシュの発光波形すなわち放射束の時間的な変化を求めるには、受光器の光電流を電圧に変換し、その電圧波形を波形観測装置や波形記憶装置に入力する方法が採られる。¹⁾²⁾この場合、電流-電圧変換回路は、その後の波形の演算処理の内容にもよるが、一般には発光波形のもつ時間周波数スペクトルの存在する周波数帯において、周波数特性の振幅伝達率が平坦でかつ位相特性が、周波数に比例(遅れ時間一定)していなければならない。

4.2.2-1 並列帰還方式(電流-電圧変換器)

受光器の光電流を電圧に変換する最も一般的な回路を図4.2.2-1に示した。まず、基本的な動作について述べる。受光器P.Dの出力電流 $I(t)$ が R_{f1} にのみ流れたとすると(S_1 、 S_2 がOFFのとき)、初段の電流-電圧変換器の出力電圧 V_{o1} は、受光器が等価的に電流源と見なせるので、その演算増幅器の入力抵抗 R_{iN} が $R_{f1} + R_b$ より十分大きいとき(4.2.2-1)式となる。

$$V_{o1} = R_{f1} \cdot I(t) + V_{os1} + (R_{f1} + R_b) I_{os1} \quad (4.2.2-1)$$

ただし、 V_{os1} 、 I_{os1} : OP₁のオフセット電圧、及びオフセット電流
 $I(t)$ は受光器側に流れる方向

また、2段目のバッファ増幅器(BA₁)の出力電圧 V_{o2} は(4.2.2-2)式となる。

$$V_{o2} = R_{f1} \cdot I(t) + V_{os1} + V_{os2} + (R_{f1} + R_b) I_{os1} \quad (4.2.2-2)$$

ただし、 V_{os2} : バッファ増幅器のオフセット電圧

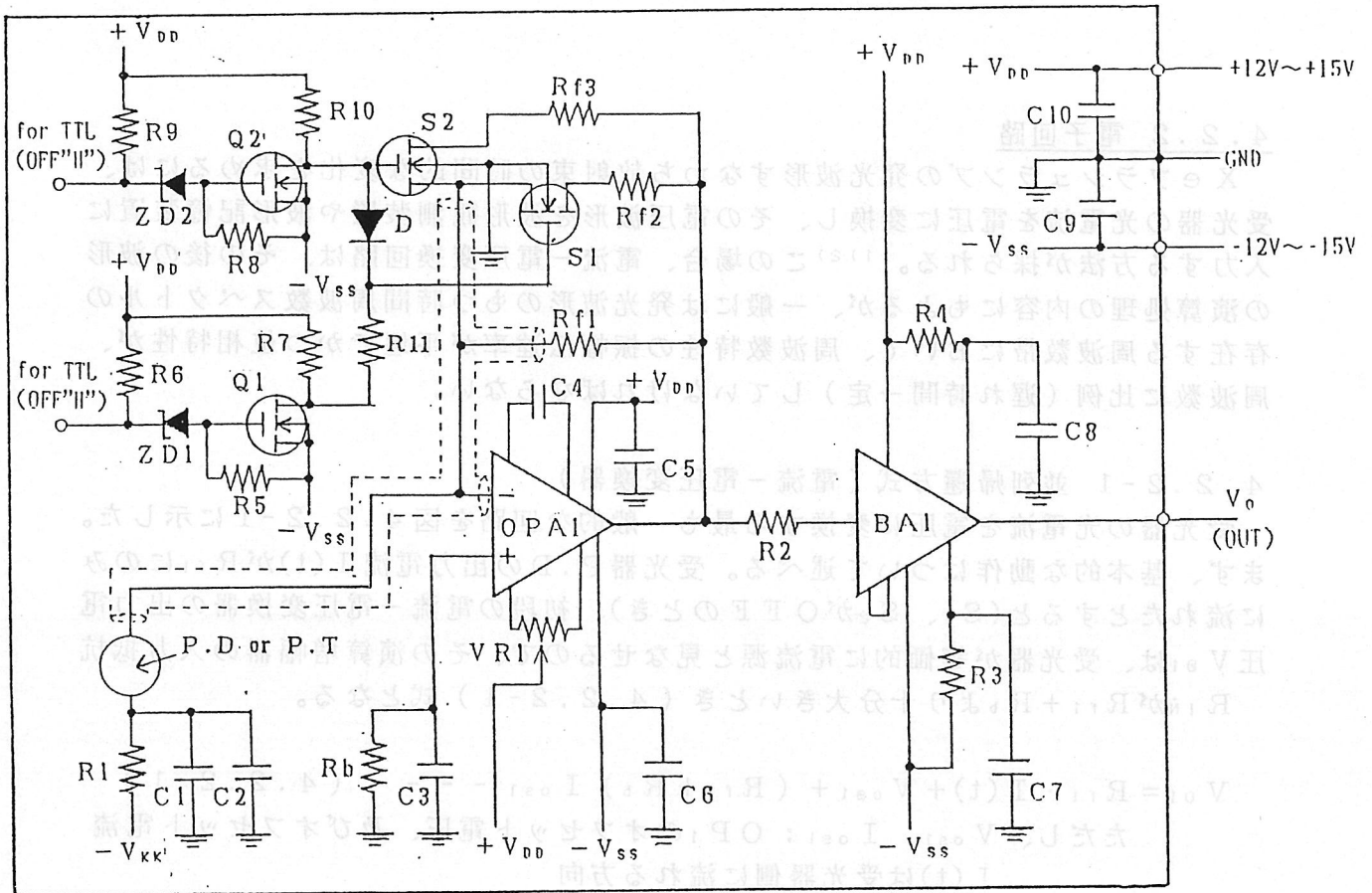
受光器出力電流 $I(t)$ は、光電流 $I_L(t)$ と暗電流 I_D との和であるから、 $I_L(t) = 0$ のとき、オフセット調整用のトリマ VR_1 によって $V_{o2} = 0$ になるようにすれば、せん光が入射したときの出力電圧 V_{o2L} は

$$V_{o2L} = R_{f1} \cdot I_L(t) \quad (4.2.2-3)$$

となり、受光器光電流に比例した出力が得られる。

ただし、この回路は広帯域周波数特性をもたせるために回路構成の上でいくつかの工夫がなされている。広い周波数帯域の電流-電圧変換器を作製する上で、まず重要となるのは演算増幅器の選択である。すなわち、使用する演算増幅器及びバッファ増幅器はスルーレートが大きく、最大振幅周波数特性の広いものであり、入力オフセット電流及び入力オフセット電圧が小さく、入力換算ノイズ電圧もまた小さいものが望ましい。図4.2.2-1はOP A₁にLH0032、BA₁にLH0033³⁾

(NATIONAL SEMICONDUCTOR)を用いた回路である。受光器P.DにはPINホトダイオード又は光電管のいずれかを使用することになるが、ここでは光電流が1



- | | | | |
|-----------|--------------------|------------|-----------------------------------|
| $+V_{DD}$ | : +15V | C1 | : 47 μ F (タンタル or ケミコン) |
| $-V_{SS}$ | : -15V | C2 | : 0.1 μ F (セラミック) |
| $-V_{KK}$ | : -90 ~ -150V | C3 | : -- |
| R1 | : 1 ~ 2 k Ω | C4 | : 1 ~ 5 pF (ポリスチレン: 実験的に値を決める) |
| R2 | : 51 Ω | C5 | : 0.1 μ F (セラミック) |
| R3 | : 150 Ω | C6 | : 0.1 μ F (セラミック) |
| R4 | : 150 Ω | C7 | : 0.1 μ F (セラミック) |
| R5 | : 1.5 k Ω | C8 | : 0.1 μ F (セラミック) |
| R6 | : 3 k Ω | C9 | : 4.7 μ F (タンタル) |
| R7 | : 15 k Ω | C10 | : 4.7 μ F (タンタル) |
| R8 | : 1.5 k Ω | OPA1 | : LH0032 (NATIONAL SEMICONDUCTOR) |
| R9 | : 3 k Ω | BA1 | : LH0033 (NATIONAL SEMICONDUCTOR) |
| R10 | : 15 k Ω | P.D or P.T | : PINホトダイオード or 光電管 |
| R11 | : 51 k Ω | S1, S2 | : SD210 (Siliconix) |
| Rf1 | : 300 k Ω | Q1, Q2 | : SD210 (Siliconix) |
| Rf2 | : 60 k Ω | ZD1, ZD2 | : MA1160 (V_{SS} +1V) |
| Rf3 | : 12.5 k Ω | D | : ダイオード |
| Rb | : 0 Ω | | |
| VR1 | : 10 k Ω | | |

図 4.2.2-1 並列帰還方式の電流-電圧変換器

mA程度までとれるPINホトダイオードを用いる場合について記述する。従って、抵抗 R_1 は $-V_{SS}$ に接続する。また、 R_1 は $1 \sim 2 \text{ k}\Omega$ 程度の抵抗で良く、 C_1 、 C_2 は受光器光電流によるバイアス電圧の変化を防止するためと高周波ノイズを除去するためのもので、 $C_1=47 \mu\text{F}$ 、 $C_2=0.1 \mu\text{F}$ 程度を使用する。 R_b はバイアス電流による差動入力端の電圧降下を等しくするために、通常 $R_{r1} \sim R_{r3}$ と同程度の抵抗を選ぶが、LH0032の様に入力差動対がJFETのものや、MOSFETのもの場合はバイアス電流が 1 nA 以下なので $R_b=0$ 即ち、演算増幅器の非反転入力端子は、直接アースに接続する。また、 $R_{r1} \sim R_{r3}$ は受光器光電流と電源電圧 $+V_{DD}$ 及び $-V_{SS}$ によって決めることになり、PINホトダイオードの様に光電流の最大値 $I_{Lmax}=1 \text{ mA}$ 程度まで直線性の得られる受光器の場合、 R_r の最小値は次式より計算される。

$$R_{r3} \parallel R_{r2} \parallel R_{r1} = (V_{DD} - 2(V)) / I_{Lmax} \quad \text{--- (4.2.2-4)}$$

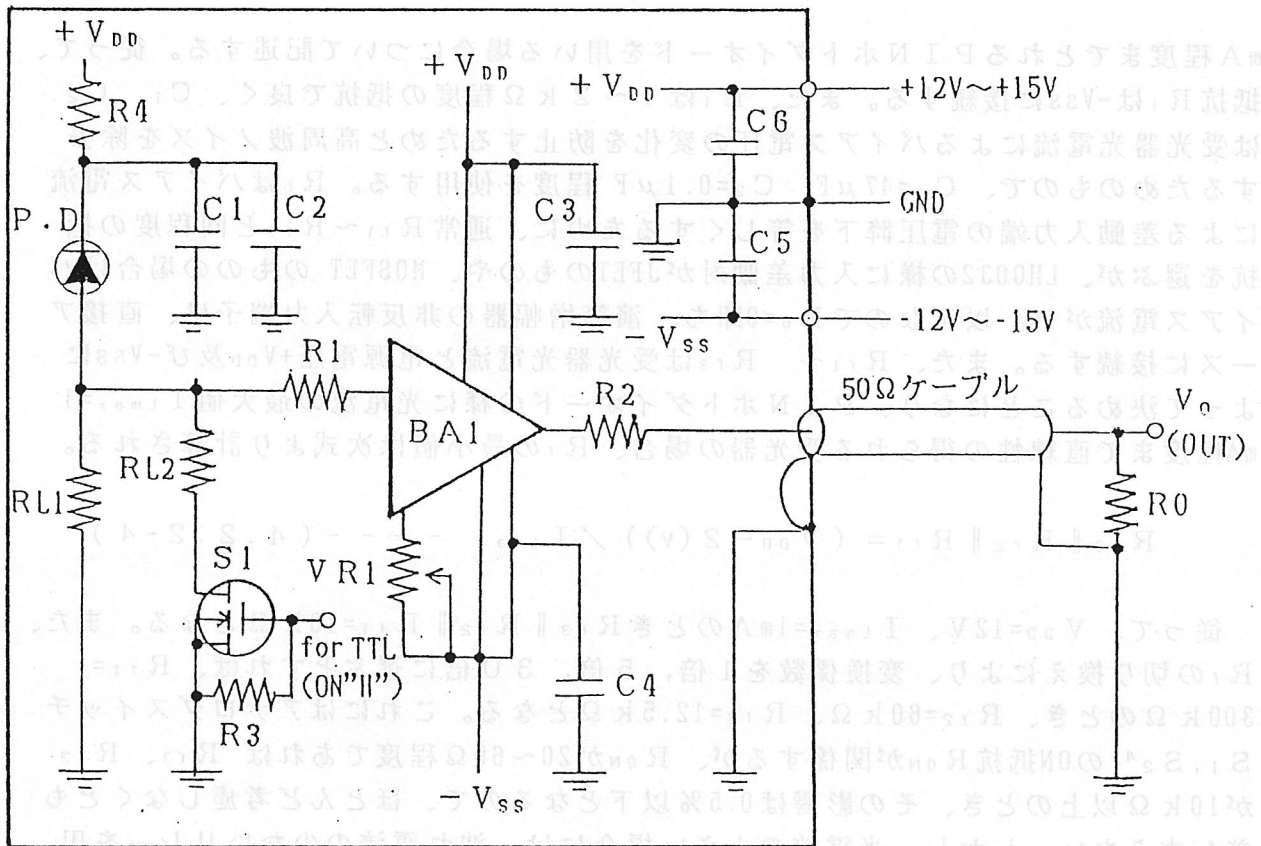
従って、 $V_{DD}=12 \text{ V}$ 、 $I_{Lmax}=1 \text{ mA}$ のとき $R_{r3} \parallel R_{r2} \parallel R_{r1}=10 \text{ k}\Omega$ となる。また、 R_r の切り換えにより、変換係数を1倍、5倍、30倍に選ぶとすれば、 $R_{r1}=300 \text{ k}\Omega$ のとき、 $R_{r2}=60 \text{ k}\Omega$ 、 $R_{r3}=12.5 \text{ k}\Omega$ となる。これにはアナログスイッチ S_1, S_2 のON抵抗 R_{ON} が関係するが、 R_{ON} が $20 \sim 60 \Omega$ 程度であれば R_{r3} 、 R_{r2} が $10 \text{ k}\Omega$ 以上のとき、その影響は 0.5% 以下となるので、ほとんど考慮しなくとも差し支えない。しかし、光電流の小さい場合には、洩れ電流の少ないリレーを用いた方がよい（ただし、この場合は R_f の出力側にスイッチを入れる）。いずれにしても、開放時の接点間容量 C_0 の小さいものでないと広帯域特性が得られなくなるので注意を要する。 C_4 は発振防止のために挿入するコンデンサで $2 \sim 7 \text{ pF}$ 程度にする。また、 BA_1 に接続されている抵抗 R_3, R_4 は、出力端短絡時の電流制限抵抗である。

このような電流-電圧変換器の作製にあたっては、入力端子と出力端子の間を極力離して配置するとともに、 OP_1 の反転入力端子をガードリングで囲む。また、回路全体を金属のケースに収め、共通GROUNDにして、シールドしなければならない。以上のような配慮により、 $R_{r1}=300 \text{ k}\Omega$ の場合でも、 2 MHz 程度の周波数帯域は容易に得られる。

4.2.2-2 直列帰還方式（非反転増幅器）

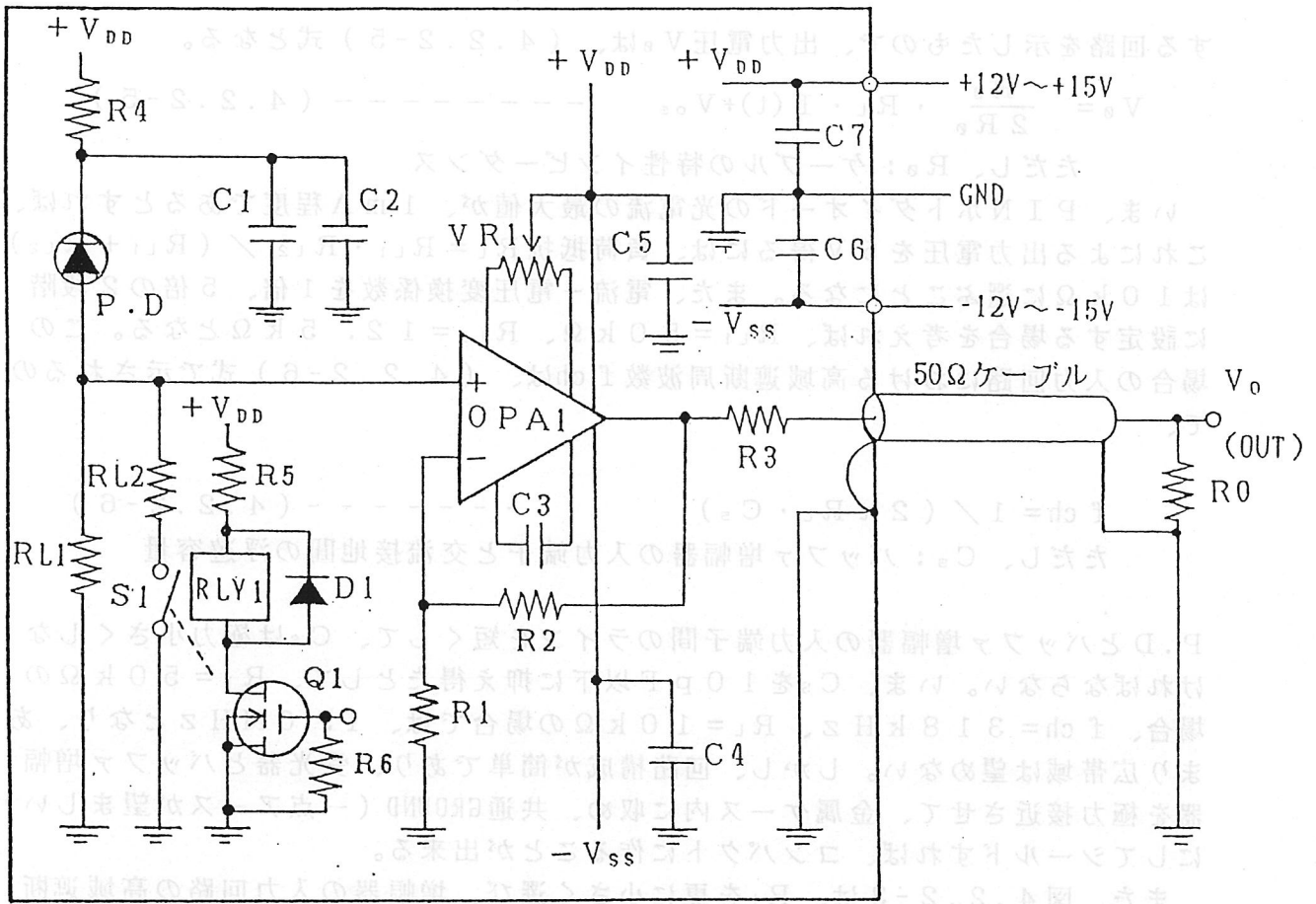
光電管の様に光電流の最大許容値が $1 \mu\text{A}$ 程度の受光器の場合、アノード回路に直接負荷抵抗 R_L を挿入して、電流-電圧変換を行えば変換係数は R_L で決まるので、出力電圧を大きくするには R_L を大きくしなければならない。しかし、測光の立場から、この電圧を計測あるいは増幅（又はレベル変換）しようとしたとき、アノード回路と交流接地間に浮遊容量が存在するため、 R_L が大きいと広い周波数帯域が得られなくなる。従って、光電流を直接負荷抵抗に流す方式で広帯域特性を得るには、光電流の大きく取れる受光器を使用する場合に限られる。

図4.2.2-2は、PINフォトダイオードの光電流を R_{L1} または $R_{L1} \parallel R_{L2}$ によって電圧に変換し、これをバッファ増幅器LH0033 (BA_1)でインピーダンス変換



$+V_{DD}$: +15V	C1	: 47 μ F (タantal)
$-V_{SS}$: -15V	C2	: 0.1 μ F (セラミック)
R0	: 50 Ω	C3	: 0.1 μ F (セラミック)
R1	: 51 Ω	C4	: 0.1 μ F (セラミック)
R2	: 44 Ω	C5	: 33 μ F (タantal)
R3	: 5.1k Ω	C6	: 33 μ F (タantal)
RL1	: 50k Ω	P.D.	: PINホトダイオード
RL2	: 12.5k Ω	BA1	: LH0033 (NATIONAL SEMICONDUCTOR)
VR1	: 200 Ω	S1	: SD210 (Siliconix)

図 4.2.2-2 バッファ増幅器を用いた電流-電圧変換器



- | | |
|---------------------------------|--|
| $+V_{DD}$: +15V | C1 : 47 μ F (タンタル) |
| $-V_{SS}$: -15V | C2 : 0.1 μ F (セラミック) |
| R0 : 50 Ω | C3 : 1~5pF (セラミック) |
| R1 : 1k Ω | C4 : 0.1 μ F (セラミック) |
| R2 : 9k Ω | C5 : 0.1 μ F (セラミック) |
| R3 : 44 Ω | C6 : 33 μ F (タンタル) |
| R4 : 2k Ω | C7 : 33 μ F (タンタル) |
| R5 : (リレによって決める) | OPA1 : LH0032 (NATIONAL SEMICONDUCTOR) |
| R6 : 5.1k Ω | P.D : PINホトダイオード |
| RL1 : 5k Ω | S1 : リト ^レ リレ-接点 |
| RL2 : 1.25k Ω | Q1 : SD210 (Siliconix) |
| RLY1 : リト ^レ リレ-(12V) | D1 : 1S2135 |
| VR1 : 10k Ω | |

図4.2.2-3 直列帰還方式の電流-電圧変換器

する回路を示したもので、出力電圧 V_0 は、(4.2.2-5)式となる。

$$V_0 = \frac{R_0}{2R_0} \cdot R_L \cdot I(t) + V_{os} \quad (4.2.2-5)$$

ただし、 R_0 : ケーブルの特性インピーダンス

いま、PINホトダイオードの光電流の最大値が、1 mA程度であるとすれば、これによる出力電圧を5 V得るには、負荷抵抗 $R_L = R_{L1} \cdot R_{L2} / (R_{L1} + R_{L2})$ は10 k Ω に選ぶことになる。また、電流-電圧変換係数を1倍、5倍の2段階に設定する場合を考えれば、 $R_{L1} = 50$ k Ω 、 $R_{L2} = 12.5$ k Ω となる。この場合の入力回路における高域遮断周波数 f_{ch} は、(4.2.2-6)式で示されるので、

$$f_{ch} = 1 / (2\pi R_L \cdot C_s) \quad (4.2.2-6)$$

ただし、 C_s : バッファ増幅器の入力端子と交流接地間の浮遊容量

P.Dとバッファ増幅器の入力端子間のラインを短くして、 C_s は極力小さくしなければならぬ。いま、 C_s を10 pF以下に抑え得たとして、 $R_L = 50$ k Ω の場合、 $f_{ch} = 318$ kHz、 $R_L = 10$ k Ω の場合では、1.6 MHzとなり、あまり広帯域は望めない。しかし、回路構成が簡単であり、受光器とバッファ増幅器を極力接近させて、金属ケース内に収め、共通GROUND(一点アースが望ましい)にしてシールドすれば、コンパクトに作る事が出来る。

また、図4.2.2-3は、 R_L を更に小さく選び、増幅器の入力回路の高域遮断周波数 f_{ch} を高くし、しかも R_L が小さくなったことによる電圧の減少を非反転増幅器で増幅して、適当な出力電圧を得るようにした回路である。 $R_{L1} = 5$ k Ω 、 $R_{L2} = 1.25$ k Ω に選べば、入力回路の高域遮断周波数 f_{ch} は $C_s = 15$ pFであっても $R_L = 5$ k Ω のとき、 $f_{ch} = 2.1$ MHzとなり、かなりの広帯域になる。しかし、この場合、非反転増幅器で10倍の利得を得ているため、演算増幅器の入力換算ノイズもまた10倍に増幅されるので、信号対ノイズ比(S/N)は図4.2.2-2の回路に比較して、1/10になるのはやむを得ない。

参考文献

- 1)千葉他: 写真用エレクトロニックフラッシュの時間分解分光測光 電気学会光応用・視覚研究会資料 LAV-80-28, 1980
- 2)Chiba et al.: Measurement of temporal spectral characteristics of flashing light. Appl. Opt. Vol.20, pp2169~2170, 1981
- 3)NATIONAL SEMICONDUCTOR: LINEAR DATABOOK
- 4)Siliconix: FET DATA BOOK

4.2.3 波形記録装置

波形記録（観測）装置としては、アナログオシロコップ、デジタルオシロコップ、ウエーブメモリーの3種類があげられる。

これらすべてに共通な、波形記録（観測）装置が備えるべき条件は、装置の入力端子に印加される、時間とともに急激に変化する電圧を正しく表示・記録することである。

2.3 せん光の発光波形の時間周波数スペクトルに示したように、この報告書の対象になるせん光の周波数帯域は100 kHz～1 MHz程度である。しかし、せん光時間が数マイクロ秒のせん光の発光の立ち上がりの部分の時間的特性を正確に観測したいのであれば、光電素子と電子回路の総合周波数特性としては、10 MHz～100 MHz が要求される。

波形記録（観測）装置の方の周波数特性は、したがって、10 MHz程度が望ましい。

単に波形を観測するだけで、後でデータを数値処理する必要がなければ、アナログストレージオシロコップがあればよいが、デジタルストレージオシロコップを持っていれば、なにかにつけて便利である。

データを数値処理して、光度の時間積分値を求めるのであれば、せん光の強度（光度または光束）の分解能は10 bit以上ほしい。しかし、オシロコップでは8 bitがせいぜいで、10 bit以上を要求するなら、ウエーブメモリーを使わなければならない。せん光の波形を必要な精度で記録するためには、メモリーエリアは、4k以上ほしい。

これらの条件を満たしている、最近のデジタルストレージオシロコップとウエーブメモリーの例を以下にあげておく。

(1) デジタルストレージオシロコップ

岩通 : デジタル・ストレージ・スコープ DS-6612, DS-6411

日立 : デジタルストレージオシロコップ VC-6050, VC-6165

Philips: Digital Storage Oscilloscope PM3320

LeCroy : Digital Oscilloscope 9400

(2) ウエーブメモリー

川崎エレクトロニカ : Transient Memory KR-3252

オートニクス : オート・デジタルタイザ Model S210, S121

ソニー・テクトロニクス: プログラマブルデジタルタイザ 390AD, RTD710

5. 測定方法

光の測定を行なうための測光器には、光電素子・電子回路の選択が重要であり、さらに可視域を測定対象とする場合には分光応答度を比視感度に近似させる必要がある。特に、せん光測定を行なおうとする場合には、光電素子・電子回路の周波数特性の良好なものを使う必要がある。光電素子および比視感度合わせに関しては第4章 測定装置 光電素子、電子回路に関しては第4章 測定装置 電子回路を参考にして作製すれば十分な能力を有する測光器が得られる。

しかしながら、この様にして得られた測光器でも適切な校正が行われなければ、何を計測しているのか判らないという事にも成りかねない。

定常光での校正と異なり、せん光測定を対象とした測光器の校正を行なう上で特別注意すべき事項として次のものが考えられる。

1) 光度測定にともない、光度標準電球との値の隔たりの大きさ。

2) 受光器の分光応答度と比視感度の違いによる測定誤差。

上記の2点に関してはせん光の測定方法（コンデンサ方法、波形解析方法）によらず常に考慮する必要がある。

これらを念頭に置き以下に、測光器の校正（測定）方法・校正上の注意事項・市販のフラッシュメータによる簡易測定法について述べる。

5. 1 測光器の目盛り校正

せん光光源測定に関して行なう測光器の目盛り校正としては、光度標準電球を用い受光器との測光距離から照度値を目盛り、光度を計算により算出するのが一般的方法であろう。光源の光度、照度、測光距離の関係を（5. 1）式に示す。

$$\text{照度} = \frac{\text{光源の光度}}{(\text{測光距離})^2} \dots\dots (5. 1)$$

受光器への値付けは光度標準電球による。光度標準電球として、最も大きな値を有するものとして約 3000cd の光度標準電球が存在する。しかし、一般的には 100V500W 程度（約 300cd, 2856K）の光度標準電球を使用することになる。

せん光の測定対象となるものの最大光度は、光度標準電球の値に比べ段違いに大きい。そこで受光器の負荷抵抗、または電流・電圧変換回路の負帰還抵抗（以下、負荷抵抗と呼ぶ）を変化する事により対処するのが一般的である。

5. 1. 1 コンデンサ方法

せん光の光度測定に関しての J I S は J I S B 7093 「写真用エレクトロニックフラッシュの性能測定方法」に記述されている。測定内容はコンデンサ方法のみである。この測定方法においては、光度標準電球の光度と測光距離に応じた負荷抵抗を設定することが出来るので、標準電球との光度差からは逃げる事が出来る。ただし、コンデンサに対する周辺光による影響（ダーク処理）を考慮しておらず、さらにコンデンサ側での直線性のチェックをおこなっていないので小光度の物の測定では問題点は残る。大光度の物に付いては十分な測定結果が得られる。

測定に使用する回路が第4章 測定装置 電子回路 図4. 1. 2-1 ~ 図4. 1. 2-4の回路の様にCPUによりコンデンサへの積分時間がコントロールできる場合には以下のような測定を行なう。光度標準電球を点灯する。測光器に与える照度は(5. 1)式により得られる。まずダーク状態として時間積分(原則として1秒)を行ない測定値を得る。その後、定常光を当て同じ積分時間で測定を行ないダーク状態で得た測定値を引くことにより計算により求めた $lx \cdot s$ に対する出力値を求めることが出来る。せん光光源に関しても同様な測定を行ない出力値を得る。標準電球との光度比が大きな場合には、光度標準電球の測定時のみ積分時間を1秒以上取り計算により1秒積分時に相当する出力を計算により求める。せん光光源の光度を求める計算式を(5. 2)式に示す。

$$\text{光度} = \text{距離}^2 \times \frac{\text{せん光光源の出力値}}{(\text{標準電球出力} \div \text{積分時間})} \quad (5. 2)$$

5. 1. 2 波形解析方法

波形解析方法では、コンデンサ方法のような測定手法を用いることが出来ず、光度標準電球測定時とせん光光源測定時では負荷抵抗を切り替えざるを得ない。

そこで、各負荷抵抗間の倍率を光度標準電球を用いてチェックする必要がある。ただし、この時には光度の絶対値は必要ないので距離を自由に变化させることにより受光器の出力をかなり大きく得ることが可能となる(熱による影響を受けない範囲で使用)。測定用のデジタル電圧計のレンジを有効に利用する事によって、この方法で負荷抵抗を光度標準電球を通常測定時の値 ($10^6 \sim 10^7 \Omega$) か

ら $10^5 \Omega$ 程度までのレンジ間の倍率チェックが出来る。

せん光光源を測定する場合さらに $\sim 10^3 \Omega$ 程度までのチェックが必要となる。この範囲まで光度標準電球を使用するのは電球の光度を考えると不可能である。そこで適当なせん光光源を実際に用いて各負荷抵抗値での光量を測定し、その値を比較する。この方法では、測定用受光器及び測定用回路の周波数特性が問題となる。しかしながら、周波数特性の劣化によって測定波形は変化するが、実効光度として見た場合かなり良い評価となるので実用上十分なチェックを行なった事になる。

ここで使用するせん光光源は測定対象物を使用するのではなく、外部安定化電源あるいは大電流容量の Ni-Cd 電池を使用する写真用エレクトロニックフラッシュのような光出力の再現性が良いものを使用しなければならない。

この方法では、負荷抵抗値を含めた広範囲の直線性をチェックするものであり、各レンジ内での直線性をチェックした事では無い。しかし波形解析方法による、せん光の測定においては広範囲での直線性のチェックの方がより有効である。

光電管を受光器に使用している場合、光電出力が許容値を越えないように注意する必要がある。

デジタル波形記憶装置を使用した校正・測定法を以下に述べる。負荷抵抗のレンジ間誤差、波形記憶装置のレンジ間誤差はないものとする。波形記憶装置は 12 bit 分解能、 $1 \mu s$ 測定とする。光度標準電球による校正には波形記憶装置を用いずデジタル電圧計を使用する。(5.1) 式により校正したい照度値を得られる距離を計算により求める。この時の負荷抵抗値と出力電圧より光電流あたりの照度を得る。

$$\text{校正值} = \frac{\text{設定照度値}}{\text{出力電圧} \div \text{負荷抵抗}} \quad (5.2)$$

次に波形記憶装置を用いてせん光光源の測定を行なう。波形記憶装置の各時間ポイントでの照度 I_x を計算する。

$$\text{照度} = \frac{\text{出力bit数} \times \frac{\text{レンジ}_{D-D}}{2^{12\text{bit}}}}{\text{負荷抵抗}} \times \text{校正值} \dots (5.3)$$

発光開始時刻 t_s から終了時刻 t_e までの照度の時間積分値 $l \cdot s$ を計算する。

$$\text{照度の時間積分値} = \frac{\left[\int_{t_s}^{t_e} \text{照度} \cdot dt \right] \cdot \Delta t}{t_e - t_s} \quad \dots (5.4)$$

Δt : ここでは $1 \mu s$

照度の時間積分値 $l \cdot s$ に距離の二乗を掛けることにより光度の時間積分値 $cd \cdot s$ が得らる。

デジタル波形記憶装置（オートニクス製，12 bit， $1 \mu s$ 分解能）を使用し波形解析法により写真用フラッシュ（サンパック auto 622，ペアバルブ使用，ハイパワー Ni-cd 電源）を用いた場合のシリコンフォトダイオード使用照度計（負荷抵抗 $10^3 \sim 10^5 \Omega$ ）の測定例を図 5.1 に示す。負荷抵抗の変化にともない測定波形の立ち下がり側に変化が見られる。しかしながら実効光度の値の変化は非常に少ない。ここで与えたフラッシュ光は SCR 調光により強制的に発光を停止した波形でありコンデンサの電荷をすべて使用した場合の発光波形と異なり，かなり高い周波数成分を含んでいる。この測定で使用している電流電圧変換回路は特に周波数特性を考慮して作られたものではなく（定常光の測定用）負荷抵抗が大きくなるに従い回路の周波数特性も悪くなり高域での位相反転が生じ，減衰振動が現われている。フル発光の波形であれば，この測定例よりも測定波形の変化は少ない結果が得られる。

写真用フラッシュ（上記と同じ物）の光量を $1/128 \sim 1/1$ に変化した場合の測定結果を図 5.2 - (a)，(b) に示す。

5.2 受光器の色補正係数

せん光の測定に限らず光度測定を行なう場合には受光器の相対分光応答度を比視感度に近似させなければならない。しかし，完全に近似させることはとても不可能であり，通常は受光器の相対分光応答度を測定し測定対象となる分光分布を分布温度 2856K を基準とした分光分布からのはずれを計算で求め補正を加える。この係数を色補正係数という。せん光の測定においては，測定対象となるせん光光源の分光分布が必要であるが，個々の分光分布は異なり測定自体も容易ではな

い。そこで、せん光光源の分光分布を D_{55} , D_{65} , D_{75} と考える事にする。色補正係数の計算式を (5. 5) 式に示す。

$$K = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{D_{xx}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{2856K}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{2856K}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{D_{xx}}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda} \quad (5. 5)$$

$E_{D_{xx}}$: D_{55} , D_{65} , D_{75} 分光分布¹⁾

E_{2856K} : 2856K 分光分布

$V(\lambda)$: 標準比視感度²⁾ $S(\lambda)$: 測定用受光器分光応答度

λ_1 : 380 nm λ_2 : 780 nm

測定用受光器の相対分光応答度の測定が出来る場合には、この計算式により色補正係数を計算し補正を与えることにより正しい光度値を得ることが出来る。

第4章 測定装置 受光素子に示されたフィルタの組み合わせを参考に作れば十分な視感度補正が行なわれた受光部を得る事が出来る。

しかしながら、測光器によつては外部に出力がとれないもの、あるいは直流測定が出来ないものがある。これらの受光器の相対分光応答度の比視感度への近似度を推定するために次の方法が考えられる。

5. 2. 1 定常光 (光度標準電球) による測定

直流測定が可能な場合、分布温度 2600K, 2856K の2つの光度標準電球を用意し、測光距離を一定とし交互に点灯する。この時の受光器の出力比と光度標準電球の光度比を比較することにより受光器の相対分光応答度の比視感度への一致を確認することが出来る。ただし、この程度の分布温度範囲で大きな変化が生じるようであればキセノン放電管のように分布温度 (相関色温度) の高いものを測定するには適しない。

5. 2. 2 フラッシュ光による測定

5. 2. 1 では直流測定が出来るものが対象であり、分光分布も実際のせん光光源とかなりかけ離れたものである。

そこで実際のせん光光源を使用して受光器の相対分光応答度をチェックする。

ここでは写真用の色温度変換フィルタ CCA 4, CCA 8, CCA 12 (キヤ

ノン製) 各1枚を一組として使用する。フィルタの分光透過率を図5. 3に示す。フィルタの分光透過率・D_{55,65,75}の分光分布・比視感度データを用い以下の計算を行なう。

$$K_{cal} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{D_{xx}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{D_{xx}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad \dots \quad (5. 6)$$

E_{D_{xx}}(λ) : D_{55,65,75}分光分布 V(λ) : 標準比視感度

τ(λ) : フィルタCCA4+8+12分光透過率

λ₁ : 380 nm λ₂ : 780 nm

さらにせん光光源にフィルタを光路に挿入した場合の光量A_{fin}、光路に挿入しない場合の測定光量A_{fno}を測定する。

$$K_{meg} = A_{fno} \div A_{fin} \quad \dots \quad (5. 7)$$

K_{cal}とK_{meg}を比較することにより実際の測定光源の分光分布に近い比較を行なうことが出来る。

K_{cal}の計算結果を表5. 1に示す。シリコンフォトダイオード使用照度計、光電管照度計による実測値及び色補正係数の比較を表5. 2に示す。この結果では色補正係数のはずれが大きいほど誇張した表現となるようである。測光器の分光応答度を測定できない場合でも有る程度の色補正係数の予想が出来ることが判る。

5. 3 測定・校正上の注意事項

測定・校正を行なう上で以下の事に注意する必要がある。

- (1) 受光部の拡散板が平面拡散板ではなく、角度補正用の拡散板が装着されている場合には周辺光の影響をできる限り除去する。
- (2) 測定光源の大きさがかなり大きい場合には、光源の大きさの10倍以上の測光距離を取る。
- (3) 入射光量を調節するために減光フィルタを用いる場合には、灰色フィルタでは波長に対する分光透過率が一定では無いので、メッシュフィルタある

- いは金属蒸着フィルタを用いる方が好ましい。
- (4) 波形解析法でAD変換器を使用する場合には分解能（8 bit 以下）によっては裾部の評価を過大評価する恐れがあるので注意する。
 - (5) 測光器の光度（照度）校正に用いる光度標準電球の値は、公的機関からのトレサビリティに基づいたものを用いる。
 - (6) 測光器（受光素子）にはダイナミックレンジが広く直線性の良いものを用いる。
 - (7) 特にコンデンサ方法に使用する受光素子には暗電流の小さな物を用いる。

5. 4 市販のフラッシュメータを使用した測定

一般にカメラ店で手にいれることが出来るミノルタ製フラッシュメータIVをせん光の測光器として使用してみた。フラッシュメータIVはフラッシュ光及び定常光を測定することが出来る構造となっている。そのため定常光によるメータ校正方法、フラッシュ光の測定方法について以下に述べる。ただし別売付属品の平面受光板を必要とする。

5. 4. 1 定常光によるメータ校正

校正には光度標準電球を使用する。予め電球の光度値より特定の照度となる測光距離を（5. 1）式により計算する。

例) 電球光度 311 cd, 必要とする照度 100 lx の場合

$$\text{測光距離} = 1.732 \text{ m} = (311 \div 100)^{1/2}$$

光度標準電球のセット位置を基準として計算により算出した距離にフラッシュメータをセットする。フラッシュメータの測光モードは「AMBI」、表示モードは「EXIN」、ISOセットは「100」、TIMEセットは「1s」とする。「測定ボタン」を押し表示された「EXIN」を読みとる。この時の測定照度は、（5. 8）式により求めることが出来る（使用説明書に換算表有り）。

$$\text{照度} = 2.5 \times 2^{\text{EXIN}} \quad (5. 8)$$

以上の様にして何点かの校正値を求め真値になる補正係数を求める。

5. 4. 2 フラッシュ光の測定

フラッシュメータの測光モードを「NON. C」にする。「測定ボタン」を押しフラッシュを発光させ表示された「E x I N」を読みとる。同様にして照度値を計算で求め、定常光で得られた補正係数を掛け合わせる。この照度値にフラッシュまでの距離の二乗を掛ければ光度が得られ、さらに 0.20 で割れば実効光度を求めることが出来る。

定常光補正を表 5. 3 に、写真用フラッシュの測定値及びシリコンフォトダイオード使用照度計との値の比較を表 5. 4 に示す。5. 2. 2 に基づく測定により得られた値は 1.104 で在った。

以上の結果よりミノルタフラッシュメータ I V は実効光度の測定に十分な性能を持っていると考えることが出来る。しかしながら、「E x I N」の最低表示は -2.0 でありこの時の照度は $0.631x$ となる。測光距離を 1.0 m とした場合実効光度は 3.15 cd であり測光距離を 0.5 m まで近づけた場合でも 0.79 cd までの測定となり救命胴衣灯の「0.75 cd」近辺の値をチェックするには十分とはいえない。しかしながら余裕を持って値をクリアーするための目安としては十分に使用することが出来る性能と考えられる。更に高光度の物を測定するにはかなり有効に使用できる測光器と言える。

参考文献

- 1) Publication CIE No.15(E-1.3.1) 1971 85,86~90
- 2) Publication CIE No.15(E-1.3.1) 1971 93~102

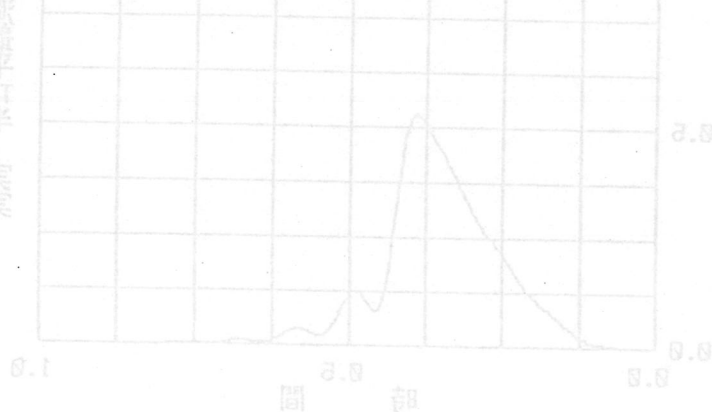
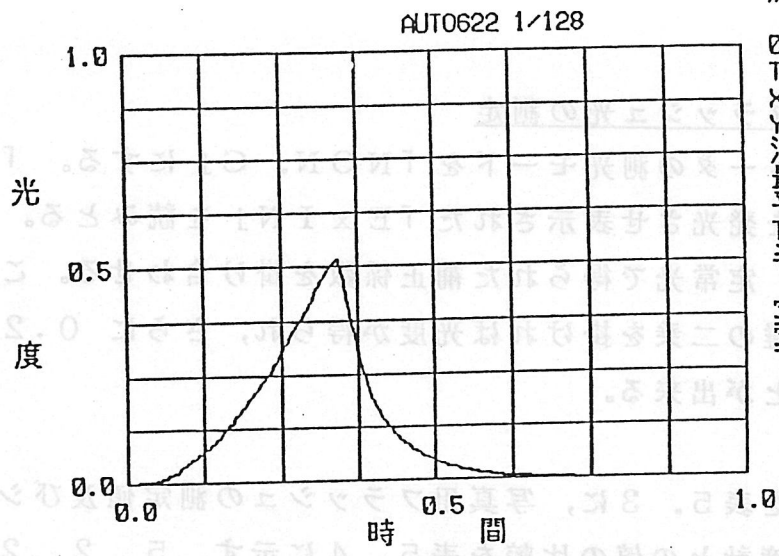
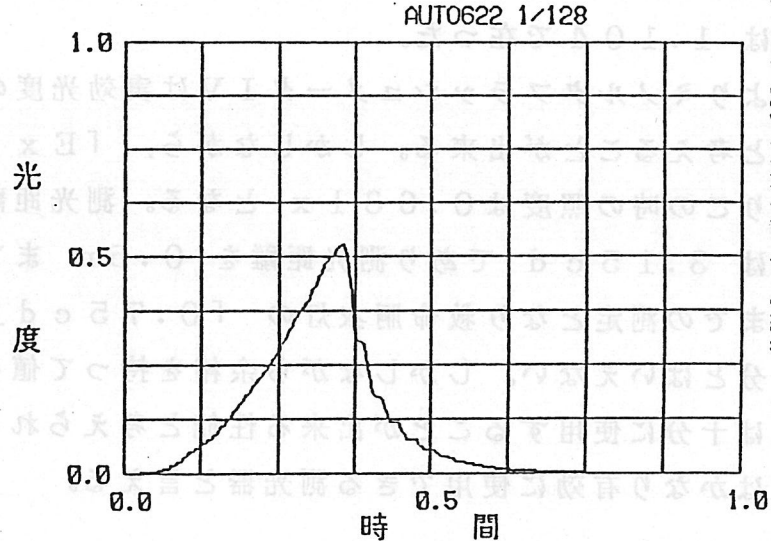


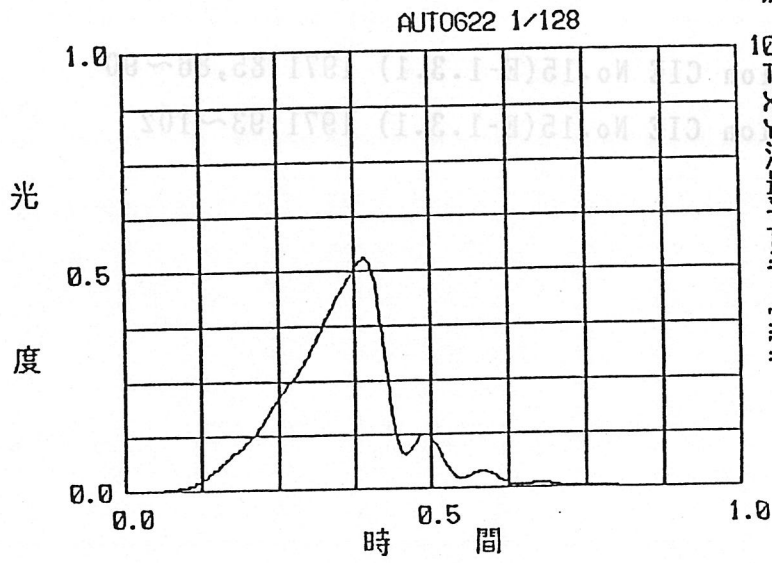
図 5. 2 写真用フラッシュの測定値及びシリコンフォトダイオード使用照度計との値の比較



0.1 [Up-p] $10^3[\Omega]$
 Tinv. : 1 [μ sec]
 X : 250 [μ sec]
 Y : 1.466E+005 [cd]
 測光距離 1.15 [m]
 最大光度 7.631E+004 [cd]
 平均光度 1.829E+004 [cd]
 Te - Ts : 191 [μ sec]
 半値幅 : 38 [μ sec]
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 1.747E+001 [cd]



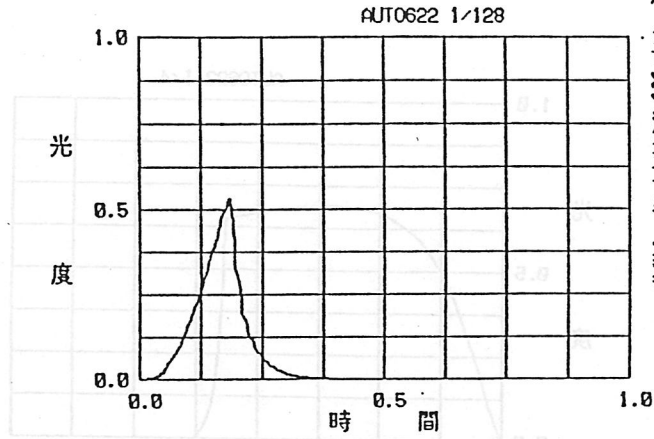
1.0 [Up-p] $10^4[\Omega]$
 Tinv. : 1 [μ sec]
 X : 250 [μ sec]
 Y : 1.466E+005 [cd]
 測光距離 1.15 [m]
 最大光度 7.818E+004 [cd]
 平均光度 1.667E+004 [cd]
 Te - Ts : 213 [μ sec]
 半値幅 : 38 [μ sec]
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 1.775E+001 [cd]



10.0 [Up-p] $10^5[\Omega]$
 Tinv. : 1 [μ sec]
 X : 250 [μ sec]
 Y : 1.466E+005 [cd]
 測光距離 1.15 [m]
 最大光度 7.816E+004 [cd]
 平均光度 1.483E+004 [cd]
 Te - Ts : 238 [μ sec]
 半値幅 : 37 [μ sec]
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 1.764E+001 [cd]

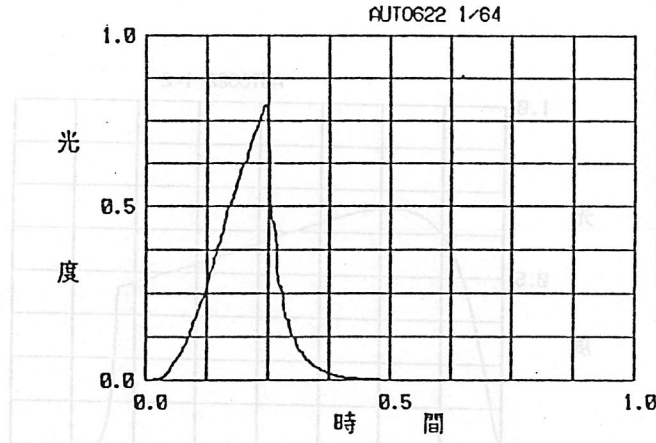
図5. 1 負荷抵抗変化による出力変化
 (シリコンフォトダイオード使用照度計)

測光器 Si C1852



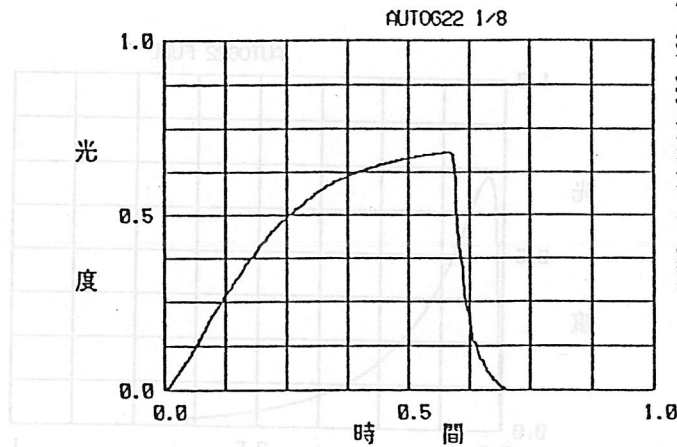
1.0(U_{p-p}) 10⁴(Ω)
 Timv. : 1(μsec)
 X : 500(μsec)
 Y : 1.246E+005(cd)
 測光距離 1.06(m)
 最大光度 6.694E+004(cd)
 平均光度 1.333E+004(cd)
 Te - Ts : 231(μsec)
 半値幅 : 39(μsec)
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 1.539E+001(cd)

測光器 Si C1852



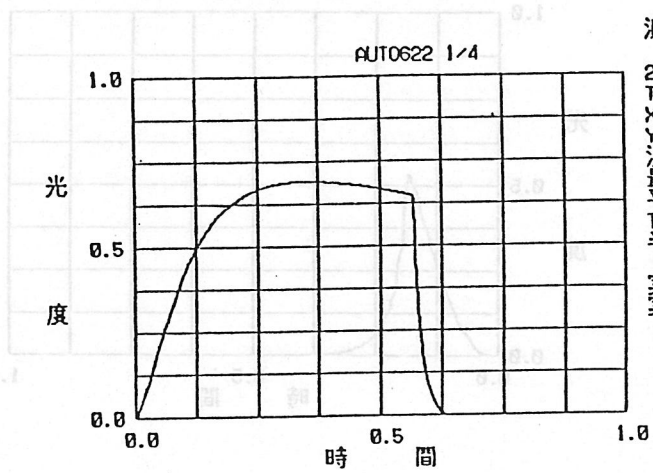
1.0(U_{p-p}) 10⁴(Ω)
 Timv. : 1(μsec)
 X : 500(μsec)
 Y : 1.246E+005(cd)
 測光距離 1.06(m)
 最大光度 9.977E+004(cd)
 平均光度 2.285E+004(cd)
 Te - Ts : 273(μsec)
 半値幅 : 57(μsec)
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 3.119E+001(cd)

測光器 Si C1852

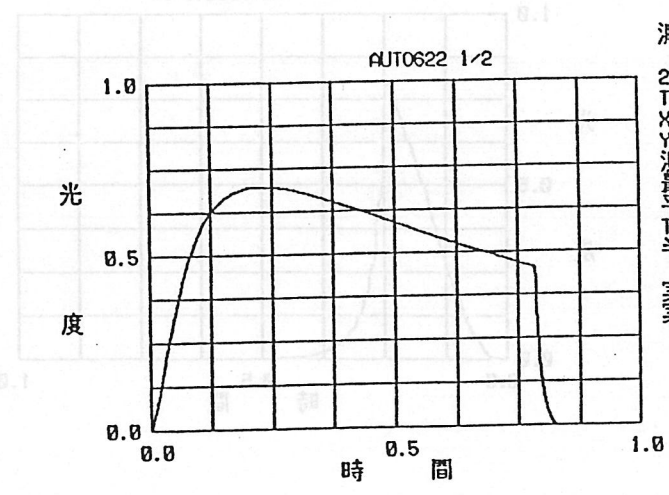


2.0(U_{p-p}) 10⁴(Ω)
 Timv. : 1(μsec)
 X : 500(μsec)
 Y : 2.491E+005(cd)
 測光距離 1.06(m)
 最大光度 1.704E+005(cd)
 平均光度 1.042E+005(cd)
 Te - Ts : 350(μsec)
 半値幅 : 225(μsec)
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 1.824E+002(cd)

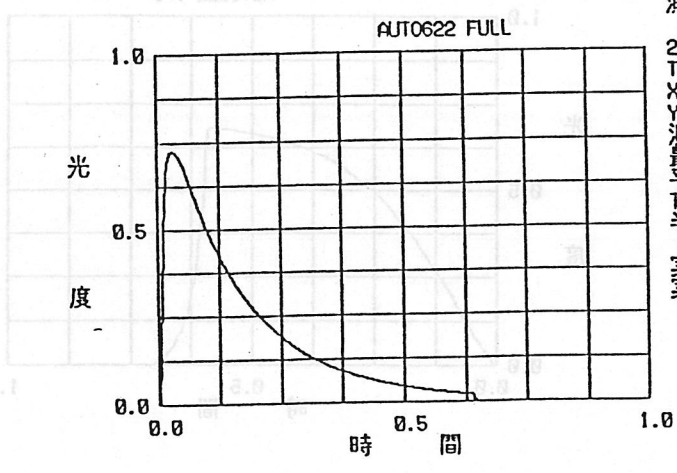
図 5. 2 - (a) 写真用フラッシュ測定例
 (光量 1/128, 1/64, 1/8)



測光器 SI C1852
 $2.0(\text{Up-p}) 10^4[\Omega]$
 $T_{inv.} : 1[\mu\text{sec}]$
 $X : 1000[\mu\text{sec}]$
 $Y : 2.491E+005[\text{cd}]$
 測光距離 1.06[m]
 最大光度 $1.724E+005[\text{cd}]$
 平均光度 $1.314E+005[\text{cd}]$
 $T_e - T_s : 628[\mu\text{sec}]$
 半値幅 : 496 $[\mu\text{sec}]$
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 $4.125E+002[\text{cd}]$



測光器 SI C1852
 $2.0(\text{Up-p}) 10^4[\Omega]$
 $T_{inv.} : 1[\mu\text{sec}]$
 $X : 1500[\mu\text{sec}]$
 $Y : 2.491E+005[\text{cd}]$
 測光距離 1.06[m]
 最大光度 $1.738E+005[\text{cd}]$
 平均光度 $1.342E+005[\text{cd}]$
 $T_e - T_s : 1234[\mu\text{sec}]$
 半値幅 : 1100 $[\mu\text{sec}]$
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 $8.282E+002[\text{cd}]$



測光器 SI C1852
 $2.0(\text{Up-p}) 10^4[\Omega]$
 $T_{inv.} : 4[\mu\text{sec}]$
 $X : 12000[\mu\text{sec}]$
 $Y : 2.491E+005[\text{cd}]$
 測光距離 1.06[m]
 最大光度 $1.807E+005[\text{cd}]$
 平均光度 $4.904E+004[\text{cd}]$
 $T_e - T_s : 7884[\mu\text{sec}]$
 半値幅 : 1656 $[\mu\text{sec}]$
 実効光度係数 : 0.20
 実効光度 $1.933E+003[\text{cd}]$

図 5. 2 - (b) 写真用フラッシュ測定例
 (8 \ I (光量) \ 1 / 4, 1 / 2, 1 / 1)

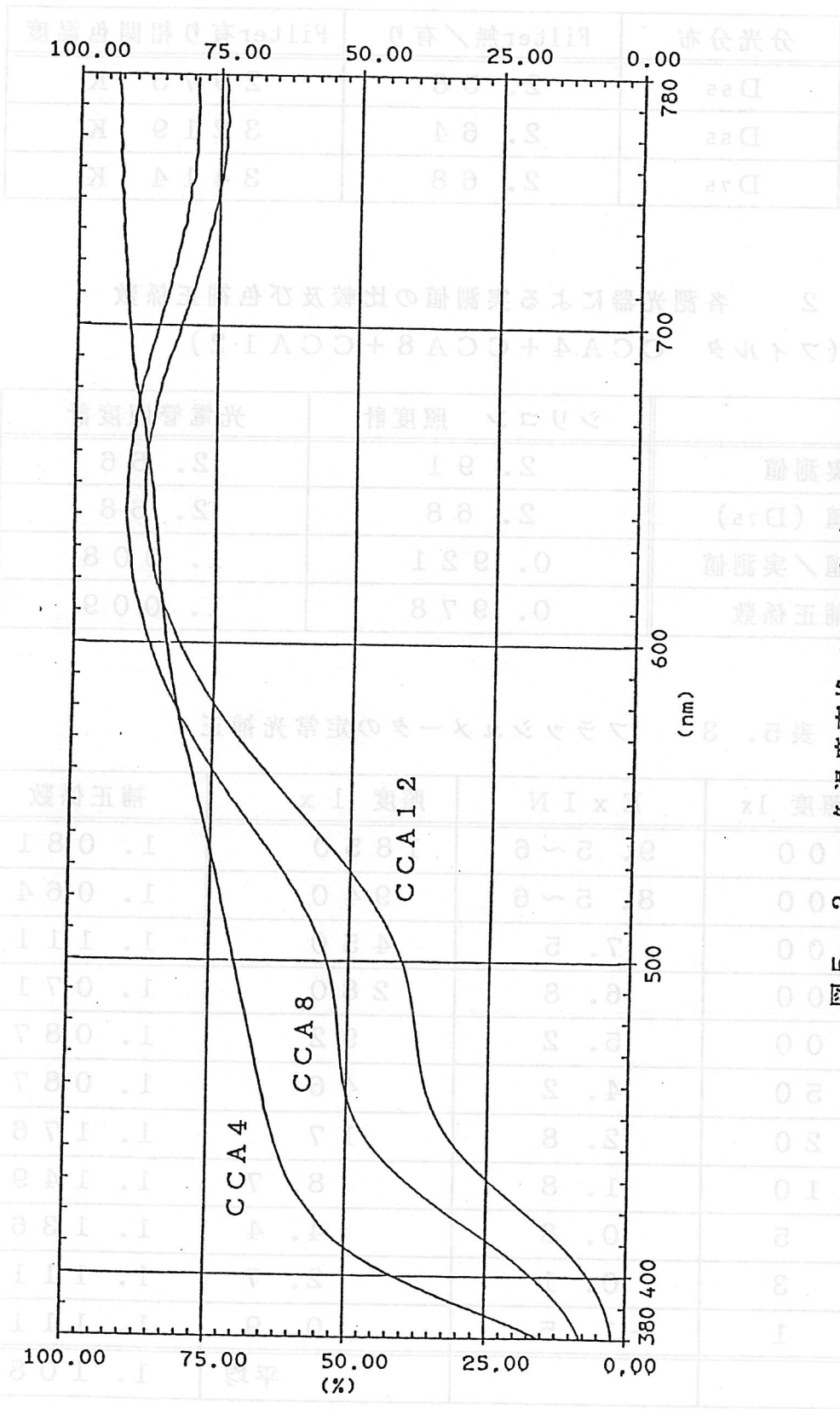


図5.3 色温度変換フィルタ分光透過率
(キヤノン CCA4, CCA8, CCA12)

表5. 1 各光源分布による視感透過率
(フィルタ CCA4+CCA8+CCA12)

分光分布	Filter無/有り	Filter有り相関色温度
D ₅₅	2. 58	2975 K
D ₆₅	2. 64	3219 K
D ₇₅	2. 68	3414 K

表5. 2 各測光器による実測値の比較及び色補正係数
(フィルタ CCA4+CCA8+CCA12)

	シリコン 照度計	光電管照度計
実測値	2. 91	2. 66
計算値 (D ₇₅)	2. 68	2. 68
計算値/実測値	0. 921	1. 008
色補正係数	0. 978	1. 009

表5. 3 フラッシュメータの定常光補正

与えた照度 lx	E x I N	照度 lx	補正係数
2000	9. 5~6	1850	1. 081
1000	8. 5~6	940	1. 064
500	7. 5	450	1. 111
300	6. 8	280	1. 071
100	5. 2	92	1. 087
50	4. 2	46	1. 087
20	2. 8	17	1. 176
10	1. 8	8. 7	1. 149
5	0. 8	4. 4	1. 136
3	0. 1	2. 7	1. 111
1	-1. 5	0. 9	1. 111
		平均	1. 108

表5. 4 写真用フラッシュの測定値及びシリコン照度計との比較
 (実効光度は距離1 m, 定常光補正係数 1.108 により算出)

光量	ExIN	lx	実効光度 cd	Si照度計 lx	差 %
1/128	0.0	2.5	13.8	15.4	-10
1/64	1.0	5.0	27.7	31.2	-11
1/32	1.7	8.1	44.9	42.9	+4.7
1/16	2.8	17	94.1	93.4	+0.8
1/8	3.7	33	183	182.4	+0.3
1/4	4.9	75	415	412.5	+0.6
1/2	5.9	150	831	828.2	+0.3
1/1	7.1	340	1883	1933	-2.6

6. 実測例

電球の光度、照度等の測定を既に行なっている研究室等において、せん光の実効光度を測定する場合、一般に使用されている光電管式照度計を使用して測定することができればかなりの時間と費用の節約になる。光電管式照度計を使用する利点は視感度補正がすでになされていること、そして波形解析方法であるから発光時間の長いせん光にも対応できることにある。難点としては、若干の改造が必要であり、且つ発光時間の非常に短いせん光には波形が若干くずれる。また、波形解析方法であるから、できればA/Dコンバータとコンピュータを使用しないと測定回数が多い場合に面倒である。

4章で説明されているセンサ、増幅器を作成し測定するのが一番確実であるが若干の手間がかかるので、多くの測定を必要とせず、実効光度の測定を目的とした場合には手持ちの光電管式照度計を改造して使用するのが簡便である。

6. 1 測定装置

光電管式照度計を使用してせん光を測定する場合には、照度計のセンサ部分のみを使用し、表示部分は使用しない。アナログ出力のついている形式のものがあるが、まず波形の立ち上がりに追従しないため使用できない。例に示す光電管式照度計の場合にはセンサ部分に光電管と増幅器及び感度切り替えが一体になっているので、オペアンプの出力の直後からシールド線でできるだけ短くケーブルを引き出す。このため、もちろん標準電球等で光度の再校正は必要である。光度のダイナミックレンジが広いので感度切り替えは必ず低い方に設定しなければならない。ケーブルを引き出した後はオシロスコープ等でせん光波形を写真撮影するのが一番簡単な方法となる。方眼用紙にうつし、手で積分計算をするか、波形部分を切りとり重量を計る方法で積分するかをして実効光度を算出する。

測定例に使用した装置は、8ビットA/Dコンバータとメモリーを組み合わせた波形記憶装置とコンピュータを使用し、実効光度の計算をおこなっている。A/Dコンバータを使用する場合にはサンプリングレートが最低 $1\mu\text{s}$ 位のものを使用する必要がある。

6. 1. 1 使用機器

i) 光電管式照度計 (センサ部分)	PI-4	東京光学
光電管 (R330型)		
ii) 波形記憶装置	model 805	biomation
分解能	8 bit	
サンプリングレート	$0.2\mu\text{s} \sim 100\text{ms}$	
メモリー	2 k バイト	
iii) マイクロコンピュータ	Apple II	Apple computer
iv) オシロスコープ	COS5021	菊水電子

6. 2 測定例

測定例として波形立ち上がりに対する照度計の追従性を簡易的に確認するための測定方法と結果を示す。

図6. 2. 1は回転ミラーとレーザを使用したせん光発生システムと光電管式照度計を使用した装置の配置図である。ミラーを回転させるモータは毎分14000回転が限度であり、 $10\mu\text{s}$ 以下のパルス幅（この章では波形の立ち上がり部分から消滅するまでの時間をいう）を持つせん光を作成する必要上簡単に平行光線を得られるレーザを使用している。精度の高い平行光線を照射する集光装置を作成すればレーザの必要性はない。

測定の方法は最初に回転ミラーを1度毎に回転し、各位置における光度を測定して基本波形を作成する。その後ミラーを回転させ波形を観測し、ミラーの回転数から計算で決まる波形及び実効光度と比較する。

ミラーの各回転数における測定されたせん光光度の波形を図6. 2. 2から図6. 2. 7、実測値と計算値の比較を表6. 2. 1に示す。

測定例に使用した装置は、光度のピーク値でみるとミラーの回転数毎分5000回転位までは数%の誤差で追従しており、この時の立ち上がりは $1\mu\text{s}$ あたり照度計の出力100mVである。せん光の波形がサイン波形であれば、およそ4.0kHz（パルス幅 $25\mu\text{s}$ ）までが限度といえる。

実際のキセノンフラッシュランプによる発光波形は立ち上がりが非常にはやく、その後ゆっくりと下がっていく波形であり、測定例に使用した装置で完全に追従させるためにはさらに増幅器等について多少の工夫が必要となる。しかしながら、表6. 2. 1に見るように光度の波形が多少崩れても実効光度計算には実測値と計算値に差がみられない。このことから、波形観測が目的でなければフラッシュランプの測定も十分可能である。

参考として図6. 2. 8に救命胴衣灯の測定例、図6. 2. 9にコンパクトカメラのフラッシュランプの測定例を示す。救命胴衣灯の測定例は距離3メートルで測定したものであるが、カメラのフラッシュランプは救命胴衣灯と比較して非常に光度が高いため、減光のために拡散板を使用し、距離5メートルで測定している。これは装置設定の関係であり、距離を大きくとって測定すれば拡散板は必要ない。

表 6. 2. 1 せん光の実測値と計算値

ミラーの 回転数 (回転/分)	ピーク値 (cd)		パルス幅 (μ s)		実効光度 (cd)	
	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値
1000	703	700	124	125	0.229	0.225
3000	697	700	41.5	41.7	0.074	0.075
5000	685	700	25.4	25.0	0.044	0.045
7000	662	700	19.0	17.9	0.031	0.032
10000	627	700	14.6	12.5	0.022	0.023
14000	557	700	12.0	8.9	0.016	0.016

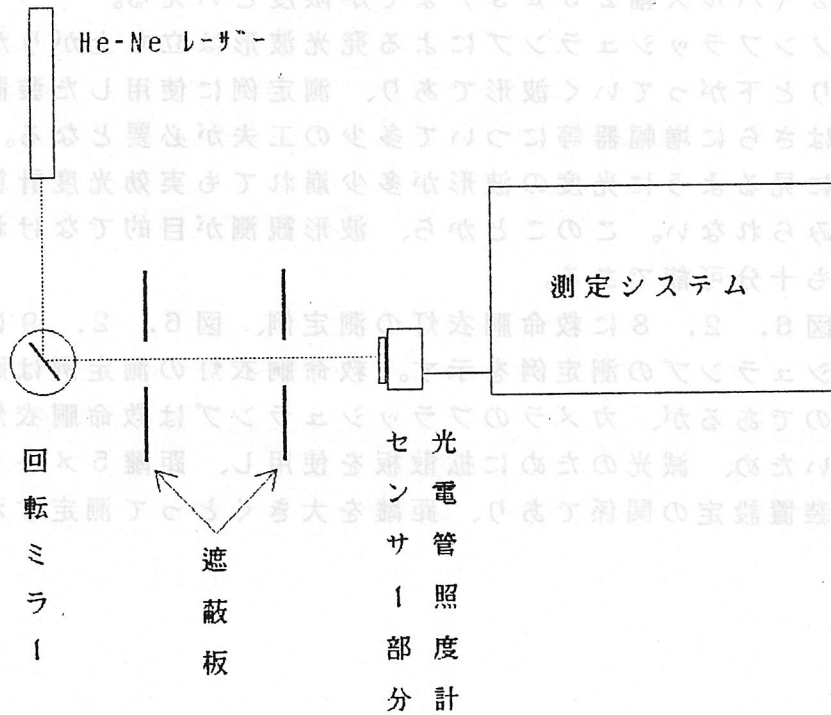
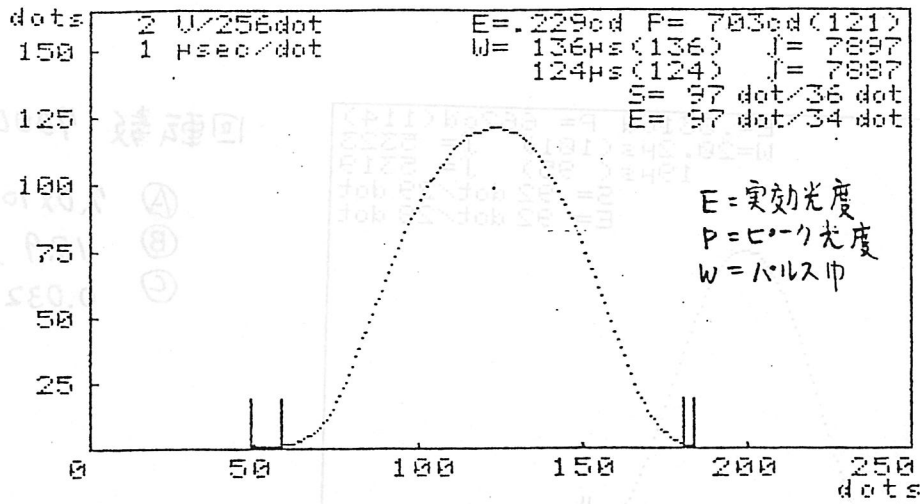


図 6. 2. 1 せん光発生システムと実効光度測定装置

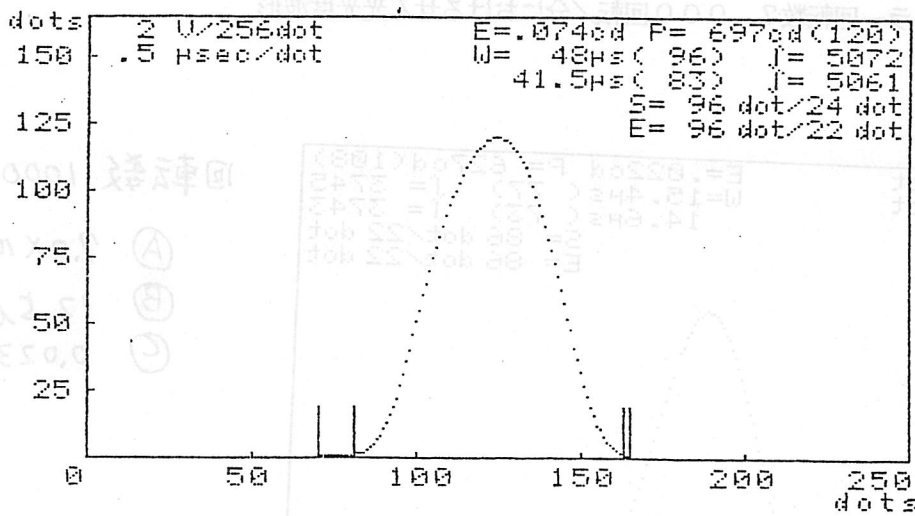


回転数 1000 rpm

基本波形からの計算値

- Ⓐ ピーク値 7.0×10^2 cd
- Ⓑ パルス巾 125 μ s
- Ⓒ 実効光度 0.225 cd

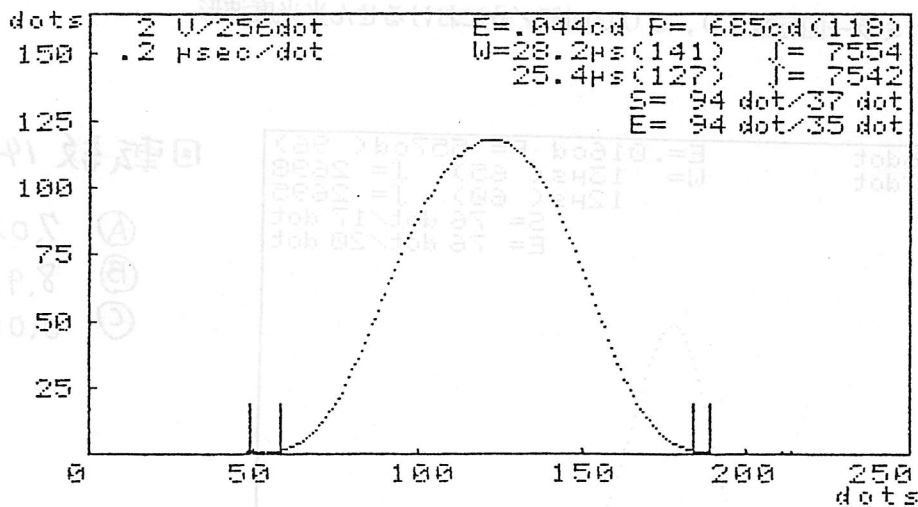
図6.2.2 ミラー回転数1,000回転/分におけるせん光光度波形



回転数 3000 rpm

- Ⓐ 7.0×10^2 cd
- Ⓑ 41.7 μ sec.
- Ⓒ 0.075 cd

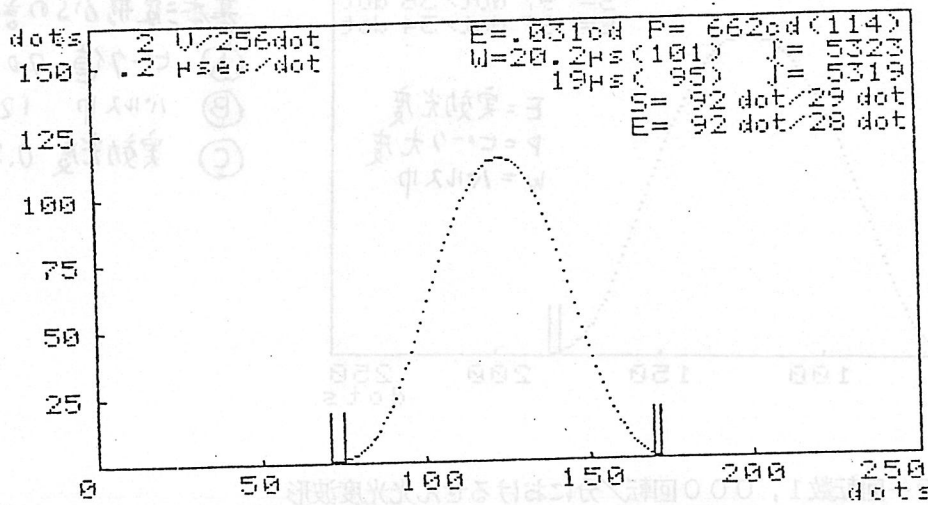
図6.2.3 ミラー回転数3,000回転/分におけるせん光光度波形



回転数 5000 rpm

- Ⓐ 7.0×10^2 cd
- Ⓑ 25.0 μ sec.
- Ⓒ 0.045 cd

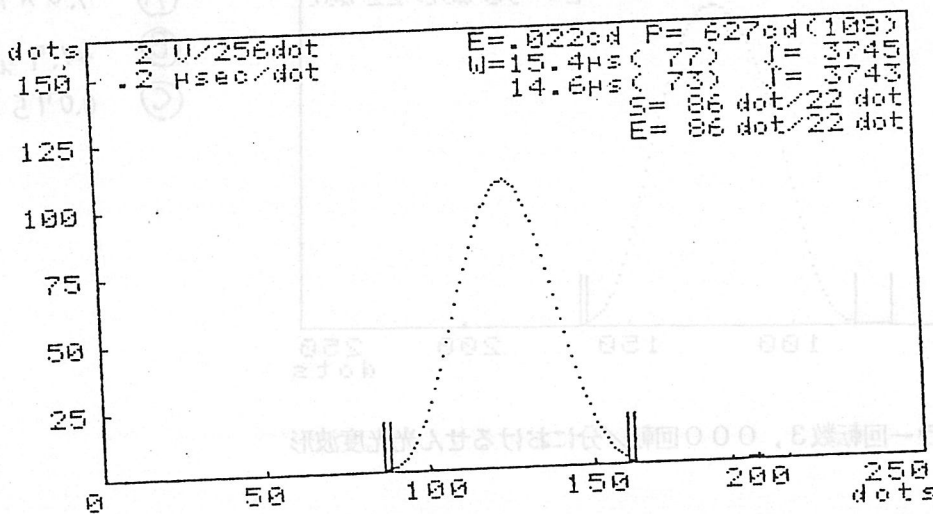
図6.2.4 ミラー回転数5,000回転/分におけるせん光光度波形



回転数 7000 rpm

- Ⓐ 7.0×10^2 cd
- Ⓑ 17.9 μ sec
- Ⓒ 0.032 cd

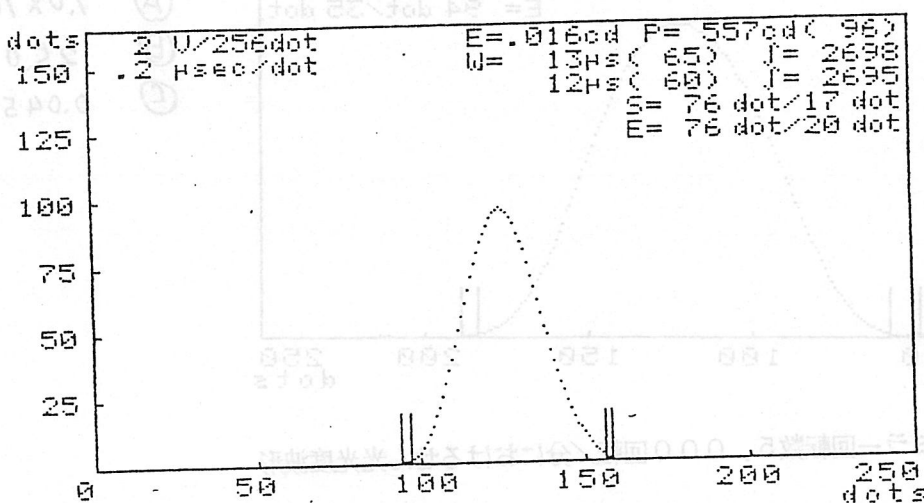
図6.2.5 ミラー回転数7,000回転/分におけるせん光光度波形



回転数 10000 rpm

- Ⓐ 7.0×10^2 cd
- Ⓑ 12.5 μ sec.
- Ⓒ 0.023 cd

図6.2.6 ミラー回転数10,000回転/分におけるせん光光度波形



回転数 14000 rpm

- Ⓐ 7.0×10^2 cd
- Ⓑ 8.9 μ sec.
- Ⓒ 0.016 cd

図6.2.7 ミラー回転数14,000回転/分におけるせん光光度波形

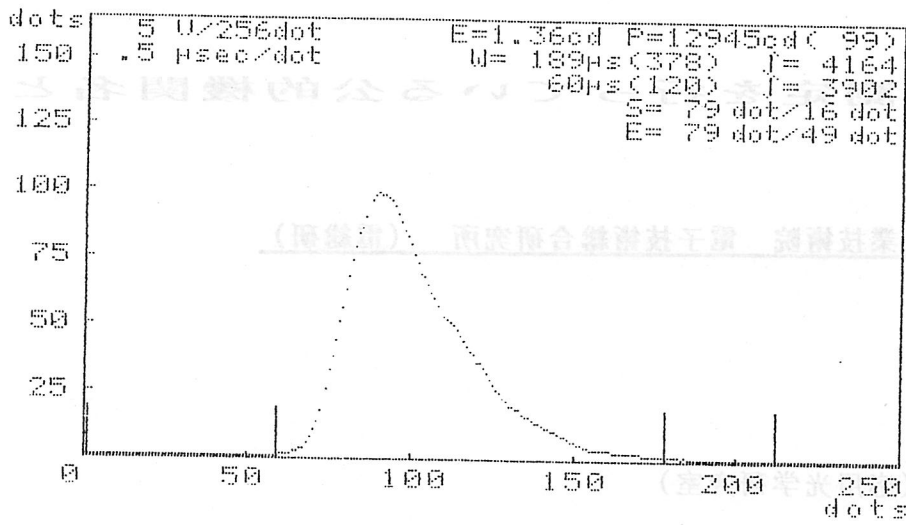


図6.2.8 救命胴衣灯のせん光光度波形 (測定距離3m)

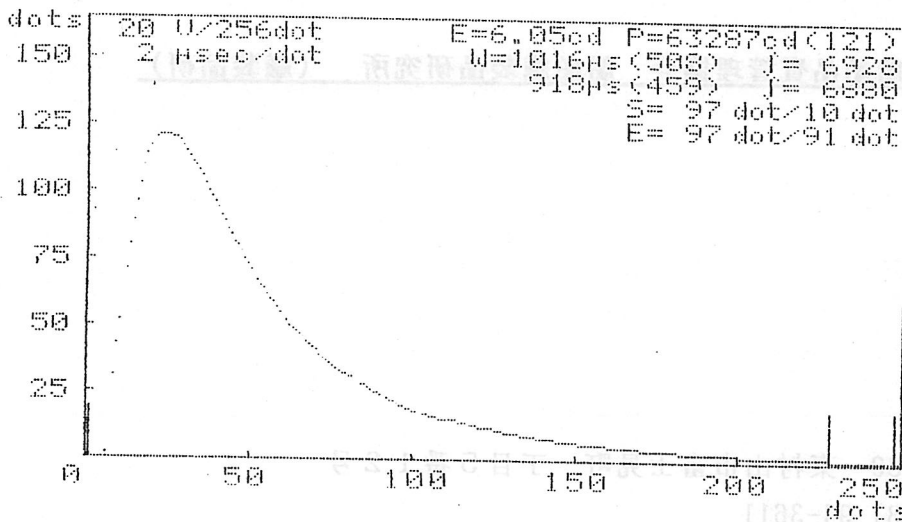


図6.2.9 コンパクトカメラのフラッシュランプのせん光光度波形 (測定距離5m:拡散板使用)

7. せん光の測定を行っている公的機関名と測定内容

7.1 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 (電総研)

7.1.1 測定内容

技術指導

7.1.2 担当者

齊藤一朗 (応用光学研究室)

7.1.3 連絡先

住 所 〒 305 茨城県つくば市梅園一丁目1番4号

電 話 (0298) 54-5398 (直通)

ファックス (0298) 55-1729 (共用)

7.1.4 費用

担当者に問い合わせる

7.2 社団法人 日本船舶品質管理協会 船舶艦装品研究所 (艦装品研)

7.2.1 測定内容

実効光度

7.2.2 担当者

村山雅己

7.2.3 連絡先

住 所 〒 189 東村山市富士見町一丁目5番12号

電 話 (0423) 94-3611

ファックス (0423) 94-1119

7.2.4 費用

担当者に問い合わせる

7.3 財団法人 日本写真機光学機器検査協会 (日写検)

7.3.1 測定内容

- (a) 波長350 nmから930 nmの範囲内の連続スペクトルせん光の発光波形
- (b) 上記の波長範囲内の単色せん光の発光波形
- (c) 上記の波長範囲内のせん光の(相対)分光放射エネルギー
- (d) 上記の波長範囲内で、せん光の発光時間内の任意の時刻における(相対)分光放射パワー
- (e) 全発光時間内の任意の時間内の全分光放射エネルギーの色度座標、色温度、ISO 分光分布指数 (ISO Spectral Distribution Index:ISO/SDI)
- (f) 発光時間内の任意の時刻における分光放射パワーの色度座標、色温度、ISO 分光分布指数

7.3.2 担当者

千葉靖裕, 吉田 尚 (試験研究部)

7.3.3 連絡先

住 所 〒 102 東京都千代田区一番町25番地

電 話 (03) 263-7111

ファックス (03) 234-4624

7.3.4 費用

約25000 円～75000 円

参考 現在はせん光の測定をしてないが、測光関係の依頼試験を行っている公的機関

(1) **財団法人 日本電気計器検定所**

〒 105 東京都港区芝浦一丁目5番6号

電 話 (03) 451-1181

(2) **東京都立工業技術センター**

〒 115 東京都北区西ヶ丘三丁目13番10号

電 話 (03) 909-2151

8. 関連規格

8. 1 SOLAS条約及び国内型式承認試験

8. 1. 1 83年改正SOLAS条約第3章

船舶関係の救難信号は、大別して遭難を知らせるアラート用信号と、遭難位置を知らせるロケート用信号がある。そして、ロケート用信号には伝達の手段として煙、音、光、無線およびこれらを併用したものなどが使用されている。このうち、光を使用し且つ点滅であることが義務づけられている信号灯は現在ない。しかし、点滅でもよいとされている信号灯の種類として次のものがある。

- a. 救命胴衣灯
- b. 自己点火灯
- c. 救命いかだ用キャノピー灯
- d. 救命艇用キャノピー灯

上記の救命設備はSOLAS第III章第30規則の救命設備の一般要件により次のような要件を満たさなければならない。

- .1 適正な工作方法及び材料で作ること。
- .2 摂氏-30度から摂氏65度の空気温度範囲での積み付け状態で破損しないこと。
- .3 使用中海中に浸る可能性のある場合には摂氏-1度から摂氏30度の海水温度範囲で作動すること。
- .4 適宜耐侵食、耐腐食性があり、海水、油または菌類により不当に影響を受けないこと。
- .5 太陽にさらされても品質の低下を招きにくいこと。
- .6 探知しやすいように全部分が高度に視認し得るような色で塗られていること。
- .7 探知しやすいように、機関の勧告*に基づく逆反射材が取り付けられていること。
- .8 波にもまれるという状況で使用される場合には、そのような状況下で十分作動すること。

などである。ただし、.7 は上記の灯には関係ない。

上記の灯はすべて、光度または光度から換算する光達距離の最低基準がある。また、せん光灯の光度は光度と時間の波形からブロンデルーレイの式によって計算される実効光度が採用されている。

そして、せん光は毎分50回以上の割合でせん光すること、海水電池を電源とするものは-1℃と+30℃における点灯は海水でよいが、常温における点灯は淡水であることなどが要件としてある。

救命胴衣灯の要件は（第32規則 救命胴衣 3救命胴衣灯）に規定されている。救命胴衣灯は救命胴衣に装着されているもので、夜間における遭難者の捜索を容易にすることを目的としており、8時間連続して0.75cdの光度を要求されている。せん光灯の場合には、集光用レンズ、ミラーの類は許されておらず、上半球すべてに光があることを前提としている。

自己点火灯の要件は（第31規則 救命浮環 2救命浮環の自己点火灯）に規定されている。自己点火灯は少なくとも2時間、上方すべての方向に2カンデラ以上の光度又はこの光度に相当する有効な光度以上でせん光することを要求されている。自己点火灯はいままでカーバイトを使用した方式のものが用いられてきたが、現在では電池式のものしかない。

救命いかだ用キャノピー灯は（第39規則 膨脹式救命いかだ 6膨脹式救命いかだの装備及び第40規則固形式救命いかだ 6固形救命いかだの装備）に規定されており、12時間以上継続して2海里以上の距離から視認し得ることとなっている。ただし、せん光灯の場合、作動開始から2時間のみ、毎分50回以上であることとなっている。その他、いかだ膨脹時に自動点灯および手動制御灯であることなどの要件がある。現在使用されているものは海水電池式が多く、またせん光式はない。

救命艇用キャノピー灯は（第41規則 救命艇の一般要件 7救命艇の装備）の中に規定されており、救命いかだ用灯とほぼ同じである。

表8. 1. 1 せん光式信号の光度に関する性能要件

種類	光度 (cd)	光達 距離 (海里)	持続 時間 (時間)	せん光 回数 (回/分)
救命胴衣灯	0.75	--	8	50
自己点火灯	2	--	2	50
救命いかだ用 キャノピー灯	--	2	12	50
救命艇用 キャノピー灯	--	2	12	50

救命いかだ用キャノピー灯と救命艇用キャノピー灯の光度要件は次式により計算された値により規定されている。

$$I = 3.43 \times 10^6 \times T \times D^2 \times K^{-D}$$

I = 灯火の光度 (cd) D = 光達距離 (海里)

T = いき値 2×10^{-7} (lx) K = 大気の透過率 0.8

この結果、2海里では約4.3cdの(実効)光度が必要とされる。

上記の表8.1における値はすべて最小値である。

救命いかだ用キャノピー灯と救命艇用キャノピー灯におけるせん光回数は、点灯開始から2時間まで50回/分以上であればよい。

8. 1. 2 型式試験項目

8. 1. 2-1 救命胴衣灯

外観検査等)

1. 外観検査
2. 寸法・質量計測

環境試験)

3. 温度繰り返し試験
4. 振動試験

性能試験)

5. 投下試験
6. 点灯試験

3. の温度繰り返し試験を終えた試験品を、次の(1)、(2)及び(3)により試験する。

- (1) 4個の試験品を -1°C 以下の海水中に沈める。
- (2) 4個の試験品を 30°C 以上の海水中に沈める。
- (3) 4個の試験品を環境温度の淡水中に沈める。

(点灯試験において、実際の試験は以下のように行われている。)

海水は3% NaCl 溶液を使用する。

試験品を各条件の海水(淡水)中に浮遊させ、連続8時間の電圧降下及び8時間後のせん光回数を測定する。その後、定電圧電源を用いて8時間後の電圧を試験品に供給し光度の測定を行う。

光度の測定点は、水平面周囲360度を10度間隔に36点、水平面を基準とし上方45度の周囲360度を10度間隔に36点、及び鉛直方向1点の合計73点を測定する。

8. 1. 2-2 自己点灯

外観検査等)

1. 外観検査
2. 寸法・質量計測

環境試験)

3. 温度繰り返し試験

性能試験)

4. 作動試験

温度繰り返し試験を終了した試験品のうち、1個については -1°C の海水中で、別の1個については 30°C の海水中で作動させる。この場合、作動開始から1時間を経過する直前の1分間は、水面下1mに試験品を水没させる。

(作動試験において、実際の試験は以下のように行われている。)

海水は3% NaCl 溶液を使用する。

試験品を各条件の海水(淡水)中に浮遊させ、連続2時間の電圧降下及び2時間後のせん光回数を測定する。その後、定電圧電源を用いて2時間後の電圧を試験品に供給し光度の測定を行う。

光度の測定点は、水平面周囲 360° を 10° 間隔に36点、水平面を基準とし上方 45° の周囲 360° を 10° 間隔に36点、及び鉛直方向1点の合計73点を測定する。

5. 浸漬試験
6. 塩水噴霧試験
7. 浮力試験
8. 落下衝撃試験
9. 強度試験
10. 投下試験
11. 点滅傾斜試験
12. 防爆試験

8. 1. 2-3 キャノピー灯

外観検査等)

1. 外観検査
2. 寸法・質量計測

環境試験)

3. 温度繰り返し試験
4. 振動試験
5. 塩水噴霧試験

性能試験)

6. 落下試験

7. 点灯試験

点灯時間が12時間であること以外は救命胴衣灯と同じ。

8. 水面に油膜がある場合の発光試験

日本消防規格 JIS S 3018

(検査用器具)

1. 点灯試験機

(発光試験機)

2. 発光試験機

(発光試験機)

3. 発光試験機

試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。

(試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。)

試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。

試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。

試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。試験機は、水面に油膜がある場合の発光試験を行うための試験機である。

4. 発光試験機

5. 発光試験機

6. 発光試験機

7. 発光試験機

8. 発光試験機

9. 発光試験機

10. 発光試験機

11. 発光試験機

12. 発光試験機

日本消防規格 JIS S 3018

(検査用器具)

1. 点灯試験機

2. 点灯試験機

(発光試験機)

3. 発光試験機

4. 発光試験機

5. 発光試験機

8. 2 国際民間航空条約

現在世界各国で運用されている航空機は国際民間航空条約により運航されているが、審議機関として同条約第43条に基づき国際民間航空機関（ICAO）を組織し国際航空の原則及び技術の発達及び運送計画を促進する事としている。

今回本委員会の検討事項に関連する飛行場における地上用灯火については、ICAOで審議を行なった同条約の第14付属書 第5章航行視覚援助施設に、また航空機に対して障害物の存在を指示する灯火については 第6章障害物表示視覚援助施設に示されている。

8. 2. 1 飛行場で使用するせん光式灯火・障害物を示すせん光式灯火

8. 2. 1-1 滑走路において使用する灯火

(a) 進入路指示灯

(b) 滑走路末端識別灯

8. 2. 1-2 飛行機に対する障害物を示す灯火

(a) 高光度航空障害灯

以上の3件である。

8. 2. 2 関連条約

これら灯火の関連条約は大要次の通りである。

8. 2. 2-1 進入路指示灯（第5章第3条5項）

進入路指示灯は着陸しようとする航空機に、その最終進入の経路に至までの進入の経路を示すために設置する灯火で、進入経路付近に山や障害物などがあつたり、また住宅密集地域で騒音防止などのため、その飛行経路を制限する必要がある場合に特に設置が必要となる。

その主たる仕様は次の通りである。

(a) 中心線及びクロスバー灯は可変白の不動光であること。

(b) 上記灯火に更に加えてコンデンサー放電灯を追加すべきである。

(c) 放電灯は一番外側のユニットから始まり末端の方向に向かって順次進むせん光を連続して1秒間に2回発するものでなければならない。

(d) 灯火の性能

- (1) せん光回数 2回/秒
- (2) せん光時間 100×10^{-6} 秒 $\sim 300 \times 10^{-6}$ 秒
- (3) ビーム範囲 水平方向30度 鉛直方向10度
- (4) 実効光度 10,000cd $\sim 17,000$ cd

8.2.2-2 滑走路末端識別灯 (第5章第3条9項)

着陸しようとする航空機に、滑走路の末端の位置を示すために、滑走路の両末端付近に設置する灯火で、その飛行場の立地条件等の観点から、航空機の着陸の安全を確保するため、必要と認められる場合に設置する。

その主たる仕様は次の通りである。

- (a) 滑走路の末端を付加的に明示の必要があるとき、または他の進入照明施設の設置が実行出来ない場合に設置すべきである。
- (b) 滑走路の10メートル外側に設置すること。
- (c) 灯火の性能は進入路指示灯と同一とする。

8.2.2-3 高光度航空障害灯 (第6章第3条14~18項)

航空機に対し航行の障害となる物件の存在を認識させるための灯火で設置については物件の頂上に設置する灯火である。

その主たる仕様は次の通りである。

- (a) 高さ150メートルを越える物件
- (b) 高架線、ケーブル等を支える塔、又は線、ケーブル等の上に標示物を取り付ける事が実行不可能と判断されたとき取付けるものとする。

(c) 灯火の性能

(1) 実効光度

背景輝度

実効光度

500cd/m²以上

200,000cd以上

50cd以上500cd/m²未満

20,000cd $\pm 25\%$

50cd/m²以下

4,000cd $\pm 25\%$

(2) せん光回数 40回/分

(3) ビーム範囲 水平方向 120度

鉛直方向 3度~7度以上

(4) せん光時間 100×10^{-3} 秒 ~ 250×10^{-3} 秒間に数回の発光を重ねた持続光とする。

8.3 JIS規格

8.3.1 B 7093-1976 写真用エレクトロニックフラッシュの性能測定方法

8.3.2 C 7611-1977 写真用せん光光源測定方法 (改正中)

8.4 ISO規格

8.4.1 ISO 1229-1972 Photography - Expendable photoflash lamps - Determination of the light output (改正中)

8.4.2 ISO 2827-1973 Photography - Determination of the light output of electronic flash equipment (改正中)

9. 参考文献

- (1) A. Blondel and J. Rey: The perception of lights of short duration at their range limits. Trans. Ill. Eng. Soc., Vol. VII (1912) 625~662
- (2) 千葉ほか: 写真用エレクトロニックフラッシュの時間分解分光測光。電気学会 光応用・視覚研究会資料 LAV-80-28 (昭55)
- (3) 千葉: ストロボ (エレクトロニックフラッシュ) 光の色再現。写真工業 昭和56年12月号 84~90
- (4) 大日方: キセノンせん光管における発光の時間特性と相関色温度との関係について。昭和51年照明学会東京支部大会予稿 (昭51) 27
- (5) 大日方: 調光式エレクトロニックフラッシュの分光分布について。昭和51年度照明学会全国大会予稿 94
- (6) 大日方: 調光式エレクトロニックフラッシュの分光特性。電総研ニュース 320号 8~11 (昭51)
- (7) Chiba et al.: Measurement of temporal spectral characteristics of flashing light. Appl. Opt. Vol. 20, (1981) 2169~2170
- (8) Chiba et al.: Automatic apparatus for measuring temporal spectral characteristics of flashing light. Proceeding of the CIE Symposium on Light and Radiation Measurement '81
- (9) 石井ほか: Xenon Flash Lamp と Light Spot Sensor を組み合わせた移動体検出システムの雑音指数。電気学会 光応用・視覚研究会資料 LAV-83-2 (昭58) 11~20
- (10) 石井ほか: Xenon Falsh Lamp の光電変換特性。昭和60年照明学会全国大会講演論文集 (昭60) 46
- (11) 石井ほか: Xenon Flash Lamp の放射束の時間周波数スペクトル。昭和63年照明学会全国大会講演論文集 (昭63) 106
- (12) 齊藤: 受光器による実用測光標準の設定に関する研究。電総研研究報告 第803号 (昭54)
- (13) 中川ほか: 受光器分光感度の紫外・可視域での精密測定(1)。照学誌 第66巻 (昭57) 439~444
- (14) 中川ほか: 受光器分光感度の紫外・可視域での精密測定(2)。照学誌 第67巻 (昭58) 514~519
- (15) 近藤ほか: せん光露光量計。光学第1巻 (昭47) 202~211
- (16) 石井ほか: Xeフラッシュランプの全放射エネルギー測定。昭和48年電気学会全国大会講演論文集 808 (昭48) 1069

- (17) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(II)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (18) 石井ほか：キセノン・フラッシュランプの放射エネルギー測定。電気学会論文集A Vol. 97 (昭52) 26~30
- (19) H. Wright et al.: Design of glass filter combination for photometer. Appl. Opt. Vol. 8 (1968) 2449~2455
- (20) Publication CIE No.15 (E-1.3.1) 1971 Colorimetry 85, 86~90
- (21) Publication CIE No.15 (E-1.3.1) 1971 Colorimetry 93~102
- (22) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(I)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (23) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(III)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (24) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(IV)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (25) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(V)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (26) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(VI)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (27) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(VII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (28) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(VIII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (29) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(IX)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (30) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(X)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (31) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XI)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (32) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (33) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XIII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (34) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XIV)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (35) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XV)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (36) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XVI)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (37) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XVII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (38) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XVIII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (39) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XIX)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (40) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XX)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (41) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXI)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (42) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (43) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXIII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (44) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXIV)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (45) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXV)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (46) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXVI)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (47) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXVII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (48) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXVIII)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (49) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXIX)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142
- (50) 石井ほか：Xeフラッシュランプの放射エネルギーの自動測光システム(XXX)。昭和49年電気学会全国大会講演論文集 (昭49) 142

10. 資料名

- (1) 日本電子機械工業会規格 RC-3801A: エレクトロニックフラッシュ用アルミニウム
非固体電解コンデンサ (1987年2月改正)
- (2) 鈴木佐喜雄 編: オプトエレクトロニクス・デバイス応用技術 近代図書 (昭62)
50~105
- (3) 浜松ホトニクス: 赤外線検出素子カタログ (1986年9月)
- (4) 富士通: 赤外線検知器, 光半導体素子カタログ
- (5) (財)光産業振興協会 監修: 光部品・製品活用事典オプトロニクス社 (昭60)
171~253
- (6) SHARP SEMICONDUCTORS DATA BOOK: OPTOELECTRONICS (Apr.1985)
- (7) EG & G ELECTRO-OPTICS: Silicon Photodiode カタログ
- (8) 三洋電機: アモルファスフォトダイオードカタログ
- (9) TRW Electronic: Optoelectronic Data Book
- (10) 光電子工業研究所: 受光素子カタログ
- (11) VACTEC OPTOELECTRONICS: フォトダイオードカタログ
- (12) CENTRONIC: SILICON PHOTODETECTORS カタログ
- (13) TEXAS INSTRUMENTS: OPTOELECTRONICS DATA BOOK
- (14) UDT: 光検出素子カタログ
- (15) AEG-TELEFUNKEN: Optoelectronic Devices 1976 カタログ
- (16) SIEMENS: OPTOELECTRONICS CATALOG 1985
- (17) 浜松ホトニクス: CdS光導電セルカタログ (1987年2月)
- (18) 浜松ホトニクス: フォトダイオードカタログ (1987年4月)
- (19) 浜松ホトニクス: 光電管カタログ (1984年9月)
- (20) 浜松ホトニクス: 光電子増倍管カタログ (1988年1月)
- (21) ANALOG DEVICES: DATA-ACQUISITION
- (22) Siliconix: FET DATA BOOK
- (23) 浜松ホトニクス: 技術資料「赤外線検出素子の特性と応用」 (1987年10月)
- (24) HEWLETT PACKARD: PIN PHOTODIODE HP5082-4200 series catalogue
- (25) NATIONAL SEMICONDUCTOR: LINEAR DATABOOK
- (26) 岩通: デジタル・ストレージ・スコープ DS-6612/6411 カタログ
- (27) 日立: デジタルストレージオシロスコープ VC-6050 カタログ
- (28) 日立: デジタルストレージオシロスコープ VC-6165 カタログ
- (29) PHILIPS: NOTEBOOK Digital Storage Oscilloscope PM3320
- (30) 東陽テクニカ: LeCroyデジタルストレージオシロスコープ9400型 カタログ
- (31) 川崎エレクトロニカ: TRANSIENT MEMORY KR-3252 カタログ
- (32) オートニクス: オート・デジタイザ MODEL S210 カタログ
- (33) オートニクス: オート・デジタイザ MODEL S121 カタログ
- (34) ソニー・テクトロニクス: プログラマブルデジタイザ 390AD型 カタログ
- (35) ソニー・テクトロニクス: プログラマブルデジタイザ RTD710型 カタログ