

〈研究ノート〉

マックスウェル視光学系

滝 浦 孝 之

(受付 2004 年 10 月 12 日)

現在の視覚研究の多くでは、刺激提示装置として CRT が用いられている。CRT を用いることで、文字や幾何学的図形といった、従来は紙やタキストスコープあるいはプロジェクタ等によって提示されていた刺激の他に、これらの機器では提示が困難であった格子パターンやガボールパッチ (Watson, Barlow & Robson, 1983) といった複雑な刺激を用いた実験を容易に実施できる。CRT ではかつての P31 のような長残光蛍光体 (DiLollo, Seiffert, Burchett, Rabeeh, & Ruman, 1997; Westheimer, 1993) は現在では用いられおらず、立ち上がり・立ち下りの急峻な刺激を提示することが可能である。視覚実験での刺激提示装置としての CRT の特性の研究も進められている (García-Pérez, & Pelli, 2001; Kline, Hu, & Carney, 1996; Pelli & Zhang, 1991)。さらに Windows マシン用には SuperLabPro (Cedrus, Macintosh 用もあり), E-Prime (Psychology Software Tools) 等, Macintosh 用には MATLAB (MathWorks), PsyScope (Carnegie Mellon University), VideoToolbox および PsychToolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997) 等の心理学実験用ソフトウェアが提供され、また PC/AT 互換機では Cambridge Research Systems から VSG2/5 という高機能の視覚刺激作成・提示用のビデオボードが出荷されるなど、以前に比べ CRT を用いた視覚実験の実施は格段に容易となっている。

このように CRT は刺激提示装置として非常に優れたものではあるが、万能ではなく、短所もいくつかある。一例として、CRT では数百 cd/m^2 以上の高輝度を得ることが難しいという事実がある。このため CRT は非常に高い輝度の刺激を必要とする ERG 測定や、視覚系を非常に高い輝度

に順応させる必要のある心理物理学の実験（選択順応法を用いた色覚の実験など）等には用いることができない。また刺激の提示時間や提示間隔はフレームレートによる制約を受けるため、細かな時間制御には限界がある。従って現在でも、実験の目的によっては、刺激提示装置として CRT とは異なる装置を選択する必要がある。本稿ではそのような刺激提示装置のうち、視感覚研究の領域で今日でもしばしば用いられているマックスウェル視光学系に関して述べるが、光学に関する理論的な事項よりも、実際にマックスウェル視光学系を用いて心理物理学の実験を行う場合に最低限承知しておくべき事柄の記述に主眼を置く。

1. マックスウェル視光学系

マックスウェル視光学系 (a Maxwellian-view optical system) は視覚研究において用いられる光学系であり、レンズや様々な光学部品をキャリアと呼ばれる取り付け具を介してベンチと呼ばれるレール状の台の上に直線上に配列したものをいう。なおマックスウェル視光学系の呼称は、これを混色実験において用いた物理学者、James Clerk Maxwell の名にちなんだものである。

マックスウェル視光学系の1つのチャンネルにおける基本的な部品の配置の模式図を図1に示す。図1において、点光源 S からの光は光源から焦点距離にあるコンデンサレンズ L_1 により集められ、平行光として光路前方に伝えられ、レンズ L_2 がそれを受ける。光源が点光源あるいは実用上点光源と見なせるものでなければ、 L_1 通過後の光は平行光とならず光源の大きさに応じて拡がる。平行光を得るのは、光の長距離伝達を行うためというのが第一の理由であるが、光路中に輝度変化用の ND フィルタや特定の帯域の波長を得るための干渉フィルタ等を挿入するのに好都合なためでもある。特に干渉フィルタは入射角により出力の波長が変化するため、使用にあたっては平行光を入射させる必要がある。

これらのレンズは1枚の光学ガラスからできている単レンズと呼ばれる

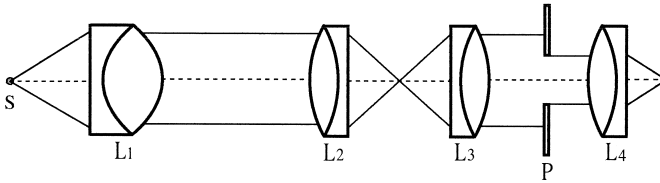


図1. 1チャンネルマックスウェル視光学系の模式図。S：光源， L_1 ：コンデンサレンズ， L_2 - L_4 ：レンズ，P：刺激ボタン。

ものではなく、クラウンガラスと呼ばれる凸レンズとフリントガラスと呼ばれる平凹レンズ（あるいはメニスカスレンズ）を貼り合わせたダブルレットと呼ばれるものが一般的である。マックスウェル視光学系で用いられるダブルレットはアクロマートまたは色消しレンズとも呼ばれ、単レンズに比べ、球面収差や色収差（2つの波長に関してのみ）に関して補正が行われている。光学系内ではクラウンガラスを平行光側に向けて使用する。これはレンズの平面側（あるいは曲率の小さなレンズ側）で光を収束させた方が球面収差を小さくできるためである。

ダブルレットは比較的厚みがあるため、薄レンズの結像公式であるニュートンの公式やガウスのレンズ公式が適用できないという点に注意すべきである。またレンズは物体側焦点距離と像側焦点距離とが一致する場合に物体（光源）と像の大きさが等しくなるので、光学系で使用されるレンズは両焦点距離が等しいものが望ましい。しかしレンズによっては焦点距離が物体側と焦点側で一致しないものがあり、使用にあたってはメーカーに特性をよく確認しておく必要がある。もっとも、比較的安価な製品ではレンズの個体差が比較的大きく、メーカーの規格表に記載されている焦点距離などの特性値と実測値との間に無視できない差が見出されることもある。

光源がハロゲンランプやキセノンアーク灯等、赤外線領域のエネルギーを多く含む場合には、Sと L_1 の間、あるいは L_1 と L_2 の間にコールドフィルタ（熱吸収フィルタ：赤外線をカットするフィルタ）を挿入しなければならない。コールドフィルタは非常に高温になるため注意が必要である。

またコールドフィルタを L_1 と L_2 の間に挿入する場合、 L_1 に光源の熱が直接かかるため、 L_1 には耐熱材質である石英製のものを使用する必要がある (末田, 1990)。

L_2 を通過した平行光は収束し、レンズの主点から焦点距離だけ前方に焦点を結ぶ。この焦点から発散する光は同じく焦点距離だけ前方のレンズ L_3 により集められ、再び平行光として前方に伝えられる。この焦点は二次的光源として機能し、ここに S の像の直径かつ被験者の瞳孔径より小さな直径のアパーチャを設置することで、刺激の網膜照度を瞳孔の大きさと無関係とすることが可能となる (Alexander, 1974; Buck, 1985; White, Collins & Rinalducci, 1976)。もちろんこの目的でのアパーチャは、S が被験者の瞳孔より大きい場合には S の直前に設置してもよい (Rains, 1963)。またここは輝度変化用の ND ウェッジや刺激提示時間制御用のシャッタなどを設置するのに適した光路内の位置でもある。これは、連続的に濃度が変化する ND ウェッジにおいては、光の直径が小さいほど光が通過する部分の濃度が均一に近くなり、また光の直径が小さいほど光路をシャッタが横切る時間が短くなり、刺激の立ち上がり・立ち下がりが急峻になるためである。

L_3 を通過した平行光は、レンズ L_4 から焦点距離の位置に置かれた刺激パターン P を通って L_4 に入射し、被験者の瞳孔面に結像する。この状態で刺激パターン P が光路に挿入されていない場合、被験者には光学系の最後のレンズ (field lens, imaging lens, あるいは Maxwellian lens などと呼ばれる) の開口部が光で満たされているように見える (Boynton, 1966; Leibowitz, 1954)。これがマックスウェル視と呼ばれる光の見えである。この事態では眼球は無調節の状態となり、無限遠に位置する対象を観察するのと同じ状態となる (Boynton, 1966)。P を光路に挿入した場合、被験者が見るのは瞳孔面に結像した光源の像ではなく、 L_4 の焦点面に位置する P の開口部である。従って P の開口部の視角 θ は、開口部の幅を d 、 L_4 の像側焦点距離を f とすると、

$$\theta = 57.3d/f \text{ (大山, 1969)}$$

により求めることができる。なおパタンのエッジ部分が厚いと、回折のためにエッジ付近が暗くなってしまうため、エッジ部分はできるだけ薄くすべきである。直線的なパタンにカミソリの刃を用いているケースもある (von Békésy, 1967)。

マックスウェル視光学系により刺激を観察する場合、 L_4 の光軸は眼球の瞳孔面に垂直であり、かつ光源の像は瞳孔の中心に位置していなければならない。これは、光が眼球に対して斜めに入射したり、入射光が瞳孔の周辺部を通過する場合、瞳孔の周辺部を通過する光に対する眼の感度は瞳孔の中心を通過する光に対する感度より低いという (第一種) Stiles-Crawford 効果 (Stiles & Crawford, 1933) が生じてしまうためである。なお、(第一種) Stiles-Crawford 効果は長く錐体視に特有の現象と考えられていたが、最近では杆体視においても認められるとする説が一般的である (和気, 1994)。

マックスウェル視光学系を用いた実験では、実験中常に光源の像を瞳孔中心に位置させておかなければならないため、頭部の固定には通常の顎載せ台では不十分であり、額当ての他に噛み板 (歯型用ワックスなどで作成された歯型を取り付けることが多い) なども備えた顔面固定具を用いる必要がある。この顔面固定具は被験者の頭部の位置を XYZ の 3 方向に微調整できるようになっているものが望ましい。光源の像の位置をを瞳孔中心部と一致させるには、池田 (1975) の紹介しているフォーコーテストの原理を利用した方法を用いるのが簡単であるが、実験者が拡大レンズを用いて確認している例もある (Stabel & Stabel, 1990; Stabel, Stabel & Hisdal, 1991)。

光学系を組む場合に最も重要なのは、光軸に垂直にかつ光軸が一直線になるようにレンズを配置することである。レンズ間で光軸がずれると像が歪み、またマックスウェル視における光の見えの均一性が損なわれる。光軸合わせの作業は、レーザービームを用いれば比較的容易に行えるが (末

田, 1990), そのような設備がない場合の光軸合わせには, オートコリメーションの原理を利用したり, アラインメント望遠鏡(地上望遠鏡)を用いるなどの方法があるが, 非常に手間がかかり, また作業にある程度の熟練も要求される。

複数のチャンネルの光路を表面鏡・プリズム・ビームスプリッタ等により合成することにより, 単一チャンネルを用いた場合よりも複雑な実験を行うことができる。この場合, 各チャンネルにおいて発生する迷光すなわち光学部品の表面から散乱する光や光学部品の保持具等に反射し散乱する光などによる結像への悪影響を減らすため, 黒く塗った衝立でチャンネル間を仕切るのがよい(Kitterle & Leguire, 1975)。衝立に塗布する黒い塗料としては, 身近なものでは墨汁が適している。

以下では光学系を用いない自然視(池田, 1975)事態での刺激提示とマックスウェル視光学系による刺激提示のそれぞれの特徴の主なものについて, Boynton (1966) や Leibowitz (1954) を参考に述べる。

(1) 自然視事態での刺激提示の特徴

a. 長所

1. 一般に刺激提示装置の組立が比較的容易である。
2. 顎載せ台はシンプルなものよく, また実験の目的によっては顎載せ台が不要な場合もある。
3. 光学系は多少なりとも像を損なう。すなわちエッジのボケやコントラストの低下などが生じる。これは光学系を構成するレンズなどの部品の伝達関数に起因するものである。自然視ではこのようなことがない。

b. 短所

1. 非常に高い輝度の刺激を提示することは一般に困難である。
2. 瞳孔は順応野や刺激の輝度が高ければ散大し, 輝度が低ければ縮瞳する。すなわち, 個人差は大きいものの, 0-数万 cd/m^2 の輝度範囲で, 瞳孔径はおよそおよそ 8-3 mm の間で変化する(de Groot

& Gebhard, 1952; Shannon, Skoczenski & Banks, 1996; ten Doesschate & Alpern, 1967; 塚原, 1985)。輝度変化範囲の狭い通常の CRT を用いた実験では、実験中に生じる瞳孔径の変化が問題となる場合は少ないと思われるが、プロジェクタなどを用いた実験では、順応野輝度を log 単位で変化させた場合、あるいは刺激輝度を log 単位で変化させた場合のいずれにおいても、瞳孔径の変化によって結果が歪められる可能性がある。これを防ぐには人工瞳孔を用いる。なお、マックスウェル視光学系を用いた実験でも、光源の像が被験者の瞳孔より大きい場合には人工瞳孔を用いる必要がある。人工瞳孔とは、瞳孔径よりも直径の小さな穴のあいた面のことであり、被験者はこれをできるだけ眼球に近づけて刺激を観察する (Palmer, 1966)。ただし、人工瞳孔の直径が約 1.5 mm 未満であれば、回折の影響のために像が損なわれる (Hilz & Cavonius, 1969)。さらに目の調節の効果のために、人工瞳孔は刺激の知覚された大きさを歪めることも報告されている (Biersdorf & Baied, 1966)。

3. CRT を用いた実験では時空間的に複雑なパターンを提示することができる。

(2) マックスウェル視光学系による刺激提示の特徴

a. 長所

1. 自然視では瞳孔を通過した光だけが眼に入るのに対し、光学系を使用して瞳孔面に刺激を結像させた場合には、レンズを通過した光が全て眼に入る。従って同じ光源を使用した場合、光学系を用いた方が高い輝度を得ることができる。また口径の大きなレンズを使用すればより高い輝度が得られる。
2. 焦点距離が短く、口径の大きなレンズを使用すれば、狭いスペースでも広い視野を得ることができる。
3. 瞳孔面の像を瞳孔より小さくすれば、刺激の網膜照度を瞳孔径の自然変化から独立させることができる。

b. 短所

1. 光学部品は厳格に配置されなければならない。従って刺激提示システムの構築に手間がかかる。
2. ガボールパッチや格子パターンといった複雑なパターンや複雑な運動を行う刺激の提示には向かない。
3. 光を被験者の瞳孔に垂直に入射させ、瞳孔の中心に像を結ばせなければならない。斜めから光が入射した場合、(第一種) Stiles-Crawford 効果が問題となる。このため大がかりな顔面固定装置が必要となる。
4. レンズ間で光軸が一直線上に並んでいる場合でも、図 1 の L_4 やその近くに配置された表面鏡、プリズム、ビームスプリッタ等に傷や汚れがあると、それらがくっきりと観察され、刺激の見えが損なわれてしまう。これは光軸が合っていない状態での刺激の見えと同様に、非常に見苦しいものである。光学部品は非常に汚れやすく、また傷につきやすいものも多く、取り扱いや保存においては十分に注意する必要がある。

2. マックスウェル視光学系を構成する部品の種類と注意点

以下では、マックスウェル視光学系を構成する部品について述べる。

a. 光学実験台・光学ベンチ・キャリア

光学実験台とは光学系を載せる台のことである。光学系は平面上に水平を保った状態で組み上げる必要があるため、剛性と安定性を備え、傾きを調整する機能のついた専用の台を用いるのが望ましい。これにはアルミニウムなどの金属製のものが多い。除震台と併用する場合もある。

光学ベンチはオプティカルベンチとも呼ばれるレール状の部品であり、その上にキャリアと呼ばれる部品を介してレンズやフィルタ等がセットされる。キャリアはベンチ上を光軸方向にスライドさせることができるよう

になっており、所望の位置でベンチに固定することができる。光学ベンチ、キャリアとも様々な種類のものが市販されているが、後者は前者の形状に合うものを使用する必要がある。

b. 光 源

視覚実験の光源には、長寿命、実験期間中に出力のレベルが安定すること、実験目的に適した出力の分光分布・光度を持つことなど、満たすべきいくつかの条件がある。マックスウェル視光学系は視覚実験において歴史のある刺激提示装置であるため、使用実績のある光源の種類も多いが、ここでは現在用いられているものについて述べる。

1. タングステン灯

ハロゲンランプが代表的である。同じ分類のランプでも用途によりいくつかの種類があり、光学機器用のものも市販されている。出力は白色で連続スペクトルを持つが、短波長領域のエネルギーが相対的に低い。安価であり、また点灯用の電源も比較的小型にすることができるのでよく用いられている。出力のレベルはかなり安定するが、長期間使用する場合には出力のモニタが必要となる。

タングステン灯をマックスウェル視光学系の光源として用いる場合には、フィラメントの均質性が問題となる場合がある。光学実験・視覚実験用にはフィラメント構造が密で一様に巻いてあるものが適するが、フィラメントの光のムラが大きい場合には、光源の前あるいは光路途中の焦点面に拡散透過面あるいは直径の小さなアパーチャ（後者はフィラメントの均質な部分からの光だけを取り出すためのもの）を挿入することにより、マックスウェル視における光の不均質性を改善することができる（Foster, 1981; McKee & Westheimer, 1970; Verdon, Haegerstrom-Portnoy & Adams, 1990）。

タングステンランプを光源に用いた場合、光路をシャッターで開閉することにより刺激の提示時間を制御する。これはタングステンランプでは、

フィラメントの温度が、電流を流して動作温度にまで上昇するのも、電流を切断して動作温度以下にまで低下するのも時間がかかるためである。シャッタは図 1 の L_2 と L_3 の間の焦点の部分に設置される。シャッタの駆動には、かつてはスピーカや拡声器の電磁石の部分やソレノイド、シンクロモータ、アナログ電流計 (ガルバノメータ)、ペンオシロの可動部 (ペンガルバノメータ) などが用いられたが、現在では市販の光学実験用シャッタの他に、ステッピングモータ (パルスモータ) が多く用いられる。ステッピングモータは入力されたパルスによりステップ動作、すなわちあらかじめ決められた角度 (ステップ角) だけ軸が回転するようになっており、コンピュータによる回転制御が容易である。ステッピングモータは身近なところでも、プリンタの紙送り機構やフロッピーディスクドライブのヘッド操作部、ビデオカメラのレンズ駆動部など、正確な位置決めを必要とする用途で用いられている。

2. キセノンアーク灯

放電管の一種である。非常に高い輝度を得ることができ、出力の分光分布がフラットに近い (太陽光に近似) ため、色覚の実験によく用いられる。またストロボ点灯が可能のため、持続時間の極めて短いインパルス光を得る目的でも使用される。連続点灯させる場合にはタングステン灯と同様にシャッタを用いて刺激の持続時間のコントロールを行う。

タングステン灯に比べ高価であり、また最近は小型化してきているが、高電圧を印加して放電させるための電源装置も大がかりなものが多い。

これらの光源は発光することにより非常に高温となり、密閉すれば破裂するため、強制空冷式 (吸い上げ式が望ましい) ないし水冷式の冷却システムを備えたランプハウスを使用する必要がある。

ランプ類は消耗品であり、長期の使用により出力が漸減するほか、短期での光量の変動も生じることが知られているため (佐藤・山下・中村・鈴木, 1991), 実験中の出力のモニタと定期的な測光を要する。

3. 発光ダイオード (LED)

表示装置等で広く使用されている素子で、非常に安価かつ小型で半永久的の寿命を持つ。発光色も紫・青・緑・黄・橙・赤など、可視域の広い範囲にわたり、光度の高いものも出荷されている。また周波数応答特性が良好で、インパルス光や変調光も容易に得ることができる。最近白色発光のものが実用化されたが、これは青色発光ダイオードの出力を蛍光体により白色光に変換しており、蛍光体の励起に時間がかかるために周波数特性が大きく劣るといふ問題がある。筆者が日亜化学工業製の白色LEDである NSPW500BN の非選別品に 500 ms のパルスを入力し、出力を光電子増倍管 (浜松ホトニクス 931A) で検出し、その波形をオシロスコープで観察したところ、立ち上がりに 100 ms 以上を要することが明らかとなった。

発光ダイオードには様々な形状のものがあるが、視覚実験では、砲弾型でレンズ部が透明なものが多く用いられる。出力は強い指向性があり、マックスウェル視光学系の光源として使用する場合には照射軸を光軸と一致させるよう注意する必要がある。また同一の型番のものでもレンズ部に個体差がある場合があり、若干の選別作業が必要となることもある。

発光ダイオードのパルス駆動はトランジスタのスイッチング作用を利用して簡単に行うことができ、また視覚実験用に振幅変調光を得る回路も公開されている (Alden, 1983; Beaty & Corwin, 1983; Nygaard & Frumkes, 1982a; Watanabe, Mori & Nakamura, 1992)。なお視覚実験用の光源としての発光ダイオードの特性は、Deforges, Garcia, Bastie, Marandet, Bernard & Magnant (1989) や Swanson, Ueno, Smith & Pokorny (1987) などにより検討されている。

4. 光変調放電管

光変調放電管は遅くとも1980年代にはほぼ生産終了となり、現在ではマックスウェル視光学系の主要な光源ではなくなっているが、周波数特

性の良好な白色光源として、依然として一部の研究者により用いられている。また、かつては特に視覚の時間的応答特性に関する研究のうちかなりのものがこれを光源として用いており、いわばこの領域での研究推進の陰の功労者とでも呼べる存在であった。ここでは、これが光源として使用された研究を参照する際にはその特性を把握しておく必要があり、またこれに関するまとまった資料が現在では入手しにくいなどの理由から、光変調放電管に関して本稿末尾に付録としてまとめておく。

c. レンズ

上述したように単レンズの使用は適当ではなく、ダブレットを用いるべきである。これをレンズホルダと呼ばれる軸付きの部品で固定し、キャリアに固定する。

レンズホルダに限らず光学系部品の支持具には黒色塗料を塗装して光を吸収させ、高い S/N 比を得るようにしなければならない。塗料は光学部品の材料より屈折率の高いものを使用する必要がある、身近なものでは黒色ラッカーよりも墨汁が適している (末田, 1990)。

d. ND フィルタ・ND ウェッジ

ND とは neutral density の略で、中性濃度と訳される。中性とは、分光透過率がフラット、すなわち透過率が波長から独立しているという意味である。また濃度は光学濃度ともいい、透過率の逆数の常用対数により示される値である。

ND フィルタにはいくつかの材質のものがあるが、光学系では通常ガラス製のものが用いられる。ガラス製のものは円形あるいは正方形のものが多く、ホルダに入れて使用する。円形のフィルタ用には、透過率の異なる複数のフィルタを取り付けるターレット型のホルダもある (これは後述の干渉フィルタのホルダとして使用されることも多い)。

ND フィルタの濃度は加算的である。すなわち、濃度 1 (透過率 10%) の

ND フィルタを濃度 2（透過率 1%）の ND フィルタと重ねた場合、全体の濃度は 3（透過率は 0.1%）となる。しかし実際には隣接するフィルタ間の反射のため、濃度の理論値と実測値は幾分異なるので、校正作業が必要である。

ND フィルタが不連続的に輝度を変化させる部品であるのに対し、ND ウェッジは輝度を連続的に変化させることができる。これには文字通り楔（wedge）型のものと、濃度が円周方向に変化する円盤形のものがある。後者の方が設置スペースが小さくて済み、また制御もしやすいことから、現在用いられているのはほとんどが後者のタイプである。これはキャリア固定用の専用のホルダに取り付けた形で販売される場合も多い。光学系の焦点面以外の位置に設置する場合には単一のウェッジでは不十分で、濃度変化方向を逆向きにした同一のウェッジ（balancing wedge）と併用する必要がある。なお円盤形ウェッジの回転角制御装置は市販のものもあるが、サーボモータ（Carpenter, 1974）やステッピングモータを用いて作成することもできる。

現在では光学系用の ND フィルタ・ウェッジとも品質の高いものが多く、ND フィルタはどの領域でも濃度が均一であり、ND ウェッジは半径方向の濃度が均一と一応考えられるが、厳密にはその保証はない。従ってこれらは基本的に、光学系内でこれらの位置する場所において校正されるべきである（Boynton, 1966; Ingling, 1970）。特にウェッジは、入射光の面積により入射光と射出光の輝度比が大きく変化するので注意が必要である。また中性とはいっても完全なものではないので、単色光を用いる場合にはその波長毎に校正を行う必要がある。

刺激の輝度の制御には絞りを利用する、すなわち光学経路途中の焦点の大きさを絞りやアパーチャにより制限するという方法もある。また偏光フィルタを 2 枚重ね、一方を固定しもう一方を回転させるという方法もある。この場合、フィルタ全体の透過率は両フィルタの偏光軸のなす角のコサインの二乗にほぼ比例するが（25–65° の範囲でおおむね直線的）、この

角度が 90° に近づくと透過率の変化は小さくなる。また偏光フィルタは中性度にも問題がある。従って現在では、光学系を用いた視覚研究では偏光フィルタは正弦波フリッカーの提示に用いられる程度である。なおタングステン灯を光源として用いた古い研究では、光源に供給する電圧を変化させて刺激の輝度を変化させているものがあるが、この方法は光源の分光分布を大きく変化させてしまうことになるため、現在では全く用いられていない。

e. 干渉フィルタ・モノクロメータ・ゼラチンフィルタ

これらはいずれも色光の提示に用いられる。干渉フィルタとは、薄膜による光の干渉を利用して特定の波長領域の光のみを選択的に透過させるフィルタであり、通常は円形である。入射角により射出光の波長が変化するため、光学系で使用する場合には、フィルタの面に対して光軸が垂直となるよう平行光中に挿入して用いられる。射出光の特性は主波長と半値幅と透過中心波長の透過率という3つの値によって示される。干渉フィルタの分光透過率は多く釣鐘型をしており、通常、透過率が最大となる波長が主波長、最大透過率の半分の透過率に対応する主波長を挟んだ2つの波長の差が半値幅である。

プリズムによる光の屈折、あるいは回折格子を用いて生じさせた回折によって得られたスペクトル光のごく狭い波長帯をスリットにより取り出す装置をモノクロメータという。視覚実験では、モノクロメータを2台組み合わせることで波長選択の精度を高め、迷光を減少させたダブルモノクロメータと呼ばれるものが主に使用される。モノクロメータは刺激波長の統制を行う装置として非常に優れたものであり、色覚の実験でよく用いられるが、価格が高いのが欠点である。

広い波長領域の刺激光を得るのに用いられるフィルタにはゼラチンフィルタなどがある。代表的なものは Eastman Kodak の Wratten gelatin filter である。

f. 反射鏡・プリズム・ビームスプリッタ

反射鏡とプリズムは光路の方向を変化させる場合に使用される。反射鏡には通常の鏡ではなく表面鏡が用いられる。これは、普通の鏡ではガラスの表面と蒸着面の2箇所での反射が起こり、光路内の設置位置によっては不都合が生じるためである。表面鏡の反射面は極めて傷がつきやすく、取り扱いには注意が必要である。また表面鏡・プリズムとも、反射面ないし入射面の角度が調整できる機能がホルダに備わっていることが望ましい。市販品ではネジとバネを用いてこの機能を実現しているものが多い。

またビームスプリッタとは、直角プリズムの底面にクロムなどの薄膜を蒸着させ、別の直角プリズムの底面と接合させたもので、1本の光路を2本に分けたり、逆に2つの光路を1つに合わせる場合に用いられる。後者の場合、刺激パターンを通過した光どうしを合わせ、複数のパターンを1つに合成することを、パターンを光学的に重ねるといふ。ビームスプリッタには光学ガラス1枚のものもある。

これらはいずれも反射率や透過率ができるだけ波長に依存しないものを選ぶ必要がある。

3. マックスウェル視光学系における測光

輝度計等の測光機器は拡散光を測定対象とすることを前提として作られているために、マックスウェル視光学系を用いて提示される刺激の輝度は、通常の測光法を用いては測定できない。以前は Boynton (1966) と Leibowitz (1954) により記述された視感測光法が広く用いられていた。すなわち、照射された拡散反射面を刺激と隣接させて設置し、反射面の輝度を変化させて刺激との明るさマッチングを行い、反射面の輝度を測定してそれを刺激の輝度とする方法である。この方法は一見すると正確な輝度の測定が困難であるとの感じを与えるかもしれないが、眼は分光分布の等しい光を比較する零検出器としての精度は高く (淵田, 1994)、明るさマッチング作業に熟達した複数の人間より得られた結果の平均値を使用すれば (Morris,

McGuire & van Cott, 1955) 信頼性に問題はない。ただし薄明視レベルの刺激強度で視野が広い場合には、この方法により網膜照度を求めることはできない。これは、網膜照度の単位としての明所視トロランド (photopic td, 通常は単に td と表記) と暗所視トロランド (scotopic td) は確立されているが、薄明視トロランドという単位は、Palmer (1967) の研究などにもかかわらず現段階では定められていないためである (Buck & Makous, 1982)。

上で述べたのは白色光の輝度測定の場合であるが、明所視では白色光と色光などの分光分布の大きく異なる光どうしでは明るさマッチングの精度が低下し、またこの方法では基本的に正しい輝度が測定できないことが知られているため (池田, 1982), 色光の輝度の視感測光には一般に交照法が用いられる。交照法の精度の高さは繰り返し確かめられている (Williams, Breitmeyer, Lovegrove & Gutierrez, 1991)。

物理測光法としては、Westheimer (1966) の方法と Nygaard & Frumkes (1982b) の方法がよく用いられている。Westheimer (1966) の方法の手順は以下の通りである。

(1) 光源の像から被験者側 x m の距離に反射率 r の完全拡散面を設置し、その輝度 \bar{B} (cd/m^2) を輝度計を用いて測定する。一般に完全拡散面には、酸化マグネシウムを蒸着したり、硫酸バリウムの粉末を圧着した平面が用いられる。

(2) 網膜照度 E (td) を式

$$E = 3.183 \cdot 10^7 \bar{B} x^2 / r$$

により算出する。ただし拡散面の輝度の測定において、マクベス照度計のような明るさマッチングを行わせる測定器を用いる場合には、光学系の射出瞳の大きさや、焦点面から測定器までの距離に注意する必要がある (Buck & Makous, 1982)。もっとも、マクベス照度計を現在も用いているケースは稀であろう。

この方法はいわば間接的な測光法であるが、より直接的に網膜照度を求

める方法が Nygaard & Frumkes (1982b) の方法である。

(1) 図1の L_4 の光軸に垂直に、半径 r の光源の像から被験者側へ d の距離に照度計の参照面を設置し、照度 E を測定する。 r と d の単位は mm, E の単位は lm/mm^2 である。 r は被験者の瞳孔半径より小さくなければならぬ。

(2) 次式により網膜照度 Er (td) を算出する。

$$Er = 10^6 E (r^2 + d^2)$$

$d > 10r$ なら、 r^2 は d^2 の 1% 未満となるので、 Er は、

$$Er = 10^6 E d^2$$

により近似できる。

マックスウェル視光学系での測光に関しては、他にも Boynton (1966, ここで述べた測定法以外の方法についても紹介している), Graham & Landis (1959), Lewis (1965) などの方法があった。

引用文献

- Alexander, K. R. (1974). Sensitization by annular surrounds: sensitization and the contrast-flash effect. *Vision Research*, **14**, 623-631.
- Alden, A. B. (1983). LED's: convenient, inexpensive sources for visual experimentation — a modified circuit. *Vision Research*, **23**, 15.
- Bartlett, N. R., & White, C. T. (1968). Cortical potentials evoked by the onset and the termination of foveal stimulation. *Psychonomic Science*, **11**, 357.
- Beatty, W. J., & Corwin, T. R. (1983). An improved circuit for control of LED luminance. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, **15**, 357-359.
- Berger, C., Mahneke, A., & Mortenson, O. (1955). Electronic flicker apparatus with automatic frequency variation. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 307-308.
- Biersdorf, W. R., & Baird, J. C. (1966). Effects of an artificial pupil and accommodation on retinal image size. *Journal of the Optical Society of America*, **56**, 1123-1129.

- Boynton, R. M. (1966). Vision. In J. B. Sidowski (Ed.), *Experimental methods and instrumentation in psychology* (pp. 273–330). New York: McGraw-Hill.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**, 433–436.
- Bruder, G. E., & Kietzman, M. L. (1973). Visual integration for threshold, signal detectability, and reaction time measures. *Perception & Psychophysics*, **13**, 293–300.
- Buck, S. L. (1985). Determinants of the spatial properties of cone-rod interaction. *Vision Research*, **25**, 1277–1284.
- Buck, S. L., & Makous, W. (1982). Calibrating Maxwellian-view optical systems. *Journal of the Optical Society of America*, **72**, 960–962.
- Buckman-Olsen, B., & Rosenfalck, A. M. (1957). Spectral energy calibration of a light flash source used in physiological experiments. *Journal of the Optical Society of America*, **47**, 30–34.
- Carpenter, R. H. S. (1974). An inexpensive servo-controlled “wedge.” *Vision Research*, **14**, 1269–1270.
- Cavonius, C. R., & Bauer, D. (1982). Stable linear modulation of glow-modulator tubes. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, **14**, 13–15.
- Deforges, J. Garcia, P. Bastie, J. Marandet, F. Bernard, J., & Magnant, D. (1989). Sources de lumière à diodes électroluminescentes. Détermination des fréquences limites et du facteur de crête de luxmètres et luminancemètres. *Journal of Optics (Paris)*, **20**, 205–217.
- de Groot, S. G., & Gebhard, J. W. (1952). Pupil size as determined by adapting luminance. *Journal of the Optical Society of America*, **42**, 492–495.
- DiLollo, V., Seiffert, A. E., Burchett, G., Rabeeh, R., & Ruman, T. A. (1997). Phosphor persistence of oscilloscope display: a comparison of four phosphors. *Spatial Vision*, **10**, 353–360.
- Engel, G. R., & Howat, M. R. (1966). The glow modulator as a source for rectangular light flashes. *Vision Research*, **6**, 479–481.
- Foster, D. H. (1981). Changes in field spectral sensitivity of red-, green- and blue-sensitive colour mechanism obtained on small background fields. *Vision Research*, **21**, 1435–1455.
- 淵田隆義 (1994). 視覚刺激とその測定法 大山 正・今井省吾・和気典二 (編) 新編感覚・知覚心理学ハンドブック 誠信書房 Pp. 263–286.
- García-Pérez, M. A., & Pelli, E. (2001). Luminance artifacts of cathode-ray tube displays for vision research. *Spatial Vision*, **14**, 201–215.
- Graham, E. H., & Landis, C. (1959). Effect of striated fields on critical flicker fre-

- quency. *Journal of the Optical Society of America*, **49**, 580–585.
- Hilz, R., & Cavonius, C. R. (1969). Comment on Schurman: effects of an artificial pupil in visual perception. *Psychonomic Science*, **14**, 200.
- 池田光男 (1975). 視覚の心理物理学 森北出版
- 池田光男 (1982). 光覚と色覚 八木 晃 (監) 相場 覚 (編) 現代基礎心理学 2 知覚 I 東京大学出版会 Pp. 47–74.
- Ingling, C. R., Jr. (1970). The calibration of neutral density wedges. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, **2**, 45–48.
- Jacobson, J. H. (1958). A precision light source for electroretinography. *A.M.A. Archives of Ophthalmology*, **60**, 137–138.
- Kitterle, F. L., & Leguire, L. E. (1975). The effect of borders and contours on threshold during early dark adaptation. *Vision Research*, **15**, 1217–1224.
- Kline, S. A., Hu, Q. J., & Carney, T. (1996). The adjacent pixel nonlinearity: problems and solutions. *Vision Research*, **36**, 3167–3181.
- Leibowitz, H. (1954). The use and calibration of the ‘Maxwellian view’ in visual instrumentation. *American Journal of Psychology*, **67**, 530–532.
- Lewis, M. F. (1965). Category judgments as functions of flash luminance and duration. *Journal of the Optical Society of America*, **55**, 1655–1660.
- Matin, L. (1964). Use of the glow modulator tube for visual research. *American Journal of Psychology*, **77**, 650–651.
- McKee, S. P., & Westheimer, G. (1970). Specificity of cone mechanisms in lateral interaction. *Journal of Physiology*, **206**, 117–128.
- Morris, A., McGuire, F. L., & van Cott, H. P. (1955). Accuracy of the Macbeth illuminometer as a function of operator variability, calibration, and sensitivity. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 255–530.
- 中山 剛 (1957). 新しい電子管式フリッカー装置 心理学研究, **28**, 124–127.
- Novak, S. (1965). Effect of electrocutaneous digital stimulation on the detection of single and double flashes of light. *Psychological Monographs*, **79**, No. 15 (Whole No. 608).
- Nygaard, R. W., & Frumkes, T. E. (1992a). LED’s: convenient, inexpensive sources for visual experimentation. *Vision Research*, **22**, 435–440.
- Nygaard, R. W., & Frumkes, T. E. (1982b). Calibration of the retinal illuminance provided by Maxwellian view. *Vision Research*, **22**, 433–434.
- 大山 正 (1969). 視覚刺激 和田陽平・大山 正・今井省吾 (編) 感覚+知覚心理学ハンドブック 誠信書房 Pp. 170–187.
- 荻坂直行 (1980). マイクロコンピュータによるリアルタイム・BASIC・ラボラトリ

——知覚実験のランダム制御—— 心理学研究, 51, 100–104.

- Palmer, D. A. (1966). The size of the human pupil in viewing through optical instruments. *Vision Research*, 6, 471–477.
- Palmer, D. A. (1967). The definition of a standard observer for mesopic photometry. *Vision Research*, 7, 619–628.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10, 437–442.
- Pelli, D. G., & Zhang, L. (1991). Accurate control of contrast on microcomputer displays. *Vision Research*, 31, 1337–1350.
- Rains, J. D. (1963). Signal luminance and position effects in human reaction time. *Vision Research*, 3, 239–251.
- Rashbass, C. (1970). The visibility of transient changes of luminance. *Journal of Physiology*, 210, 165–186.
- Riggs, L. A. (1965). Light as a stimulus for vision. In C. H. Graham (Ed.), *Vision and visual perception* (pp. 1–38). New York: John Wiley & Sons.
- Rogowitz, B. E. (1986). A practical guide to flicker measurement: using the flicker-matching technique. *Behavior and Information Technology*, 5, 359–373.
- Roufs, J. A. J. (1972). Dynamic properties in vision —I. Experimental relationships between flicker and flash threshold. *Vision Research*, 12, 261–278.
- Roush, R. G., & Hamburger, F., Jr. (1948). Light-flash generator. *Electronics*, 21, 100–102.
- 佐藤愛子・山下 豊・中村直人・鈴木一弥 (1991). 空冷式キセノンランプ光量のゆらぎ (短期変動) と視覚の時間応答特性 日本心理学会代55回大会発表論文集, 118.
- Servièrè, J., Miceli, D., & Galifret, Y. (1977). A psychophysical study of the visual perception of “instantaneous” and “durable.” *Vision Research*, 17, 57–63.
- Shannon, E., Skoczenski, A. M., & Banks, M. S. (1996). Retinal illuminance and contrast sensitivity in human infants. *Vision Research*, 36, 67–76.
- Stabel, B., & Stabel, U. (1990). Rod suppression of cone-mediated information about colour and form during dark adaptation. *Scandinavian Journal of Psychology*, 31, 139–148.
- Stabel, B., Stabel, U., & Hisdal, B. (1991). Dark adaptation on the long-wave cones at different eccentricities. *Scandinavian Journal of Psychology*, 32, 114–123.
- Stecker, S., Sandberg, M., & Minsky, P. J. (1970). Successive luminance difference thresholds and brightness as a function of the interstimulus interval and duration of successive flashes. *Perception & Psychophysics*, 7, 79–85.

- Stiles, W. S., & Crawford, B. H. (1933). The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at different points. *Proceedings of the Royal Society of London*, **127B**, 428–450.
- Stork, D. G., & Wilson, H. R. (1990). Do Gabor functions provide appropriate descriptions of visual cortical receptive fields? *Journal of the Optical Society of America, Series A*, **7**, 1362–1373.
- 末田哲夫 (1990). オプトロニクス活用のための光学部品の使い方と留意点 増補改訂版 オプトロニクス社
- Swanson, W. H., Ueno, T., Smith, V. C., & Pokorny, J. (1987). Temporal modulation sensitivity and pulse-detection thresholds for chromatic and luminance perturbation. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, **4**, 1992–2005.
- 滝浦孝之 (2003). 二重光に対する時間的弁別 —— 閾上刺激に対する視覚系の時間分解能について —— 文化, **66**, 3・4, 99–118.
- ten Doesschate, J., & Alpern, M. (1967). The effect of photoexcitation of the two retinas on pupil size. *Journal of Neurophysiology*, **30**, 562–576.
- 塚原伸晃 (1985). 瞳孔と小脳 神経研究の進歩, **29**, 765–774.
- Verdon, W., Haegerstrom-Portnoy, G., & Adams, A. J. (1990). Spatial sensitization in the short wavelength sensitive pathways under dichoptic viewing conditions. *Vision Research*, **30**, 81–96.
- von Békésy, G. (1967). Sensory inhibition. New Jersey: Princeton University Press.
- 和気典二 (1994). Stiles-Crawford 効果 大山 正・今井省吾・和気典二 (編) 新編感覚・知覚心理学ハンドブック 誠信書房 Pp. 434–439.
- 渡邊昭一 (1975). ファクシミリ受信機 窪田啓次郎 (編著) 画像エレクトロニクス講座10 ファクシミリと静止画像 コロナ社 Pp. 136–188.
- Watanabe, T., Mori, N., & Nakamura, F. (1992). A new superbright LED stimulator: photodiode-feedback design for linearizing and stabilizing emitted light. *Vision Research*, **32**, 953–961.
- Watson, A. B., Barlow, H. B., & Robson, J. G. (1983). What does the eye see best? *Nature*, **302**, 419–422.
- White, T. W., Collins, S. B., & Rinalducci, E. J. (1976). The Broca-Sulzer effect under scotopic viewing conditions. *Vision Research*, **16**, 1439–1443.
- Williams, M. C., Breitmeyer, B. G., Lovegrove, W. J., & Gutierrez, C. (1991). Metacontrast with masks varying in spatial frequency and wavelength. *Vision Research*, **31**, 2017–2023.
- Westheimer, G. (1993). Phosphor persistence in oscilloscope displays. *Vision*

付録：光変調放電管について

光変調放電管 (glow modulator tube) は、ネオン、アルゴン、ヘリウム等のガスを封入した冷陰極放電管の一種である。これには多くの種類があり、Sylvania 社から 1966 年に発行されたデータシート (Sylvania Technical Data Service: Glow modulator tubes. No. TR-29R) だけでも 9 種類が記載されているが、視覚研究において最も多く用いられたものは同社の R-1131C であり、他に 1B59/R-1130B が使用された例もある (Bartlett & White, 1968; 中山, 1957; Rashbass, 1970)。R-1131C は Sylvania 社製のものしか存在しないが、1B59/R-1130B は Z&I Aero Services (Zaerix), UNITED などのブランドでも製造されていた (これらは Sylvania 社製の後期ロット相当品と思われる)。わが国では NEC が 1B59/R-1130B の Sylvania 社製前期ロット相当品を製造し、また浜松テレビ (現浜松ホトニクス) により L289 なる型番のものが生産されていた (浜松テレビ製のものは波長が 300–500 nm ということであり、出力は 1B59/R1130-B とは異なっていたものと思われる)。なお Sylvania 社から出荷されていた、固定用の基部を持たず、ガラス管から直接リード線が出ている R-1131D の出力の特性は R-1131C と同じではないかと推測される。

放電色は R-1131C では白色、1B59/R-1130B では前期ロットは赤紫、後期ロットは白色であるが、いずれも元来ファクシミリのデコーダ、写真製版、オシログラフのタイムマーカーなどの光源として開発されたものであって、出力は連続スペクトルながら強い線スペクトルが混じり、またスペクトルの両端、とりわけ短波長領域でのエネルギーが相対的に低いという特徴を持つ。R-1131C の出力の分光分布は上記の Sylvania 社のデータシートの他、Buckman-Olsen and Rosenfalck (1957) や Riggs (1965), 渡邊 (1975) にも記載されているが、Cavonius & Bauer (1982) は、実際に測定された分光エネルギーは、これらのデータに記載されているものに比べ、特に短波長領域で低く (400 nm では公表値の 1/10)、また 600 nm より長波長の領域ではピークの数が多いことを報告している。

印加電圧は研究によって 120–350 V とかなりの幅があるが、300 V 前後である場合が多い。また電流も 12–60 mA と、これも研究間で様々であるが、おおむね 30 mA 程度の値を採用しているケースが多い。光変調放電管は電流の関数として出力のレベルが増加するが、その寿命は電流値のほぼ 3 乗に反比例する (渡邊, 1975)。

R-1131C の出力の分光分布は放電条件によって変化する。まず、分光分布は電流の関数として変化する、特に低電流領域では色温度がかなり低くなる (Anderson,

Huntington & Simonson, 1966; Cavonius & Bauer, 1982; Fritze & Simonson, 1951)。出力の持続時間によっても分光分布は変化するが、これは電流値の変化による分が大きい。パルスの持続時間の変化に伴う色の変化は、Wratten gelatin filter の No. 15 を用いて出力をフィルタすることで減少させるとされる (Servière, Miceli & Galfret, 1977)。また、持続時間のごく短いパルスを連続して出力させた場合、出力のレベルはパルス列の周波数による影響を受け、特に周波数が kHz 台になると、出力の時間的平均輝度は Talbot-Plateau の法則による予測値とかなり異なるようになる。筆者は、パルス列の周波数が 5 kHz 以上では、時間経過に伴って出力レベルが上昇することを確認している。また 1 kHz 以下の領域での周波数変調の際にも、パルス列の周波数が高くなると出力の赤みが増す場合がある。これらの現象は、管内のガスのイオン化の時間特性に起因するものであり、出力パルス列の周波数が非常に高くなれば、放電が連続に近くなり、管内のガス圧が上昇して放電条件が大きく変わるためと考えられる。ただしこれはパルス列の周波数を一定に保った場合であり、ごく短い期間周波数が変化するような事態での出力レベルは、パルスの周波数からかなり独立したものとなる。なお、出力パルスの持続時間が長い場合 (500 ms など) には、出力波形は矩形波状とはならず、途中でレベルが低下してしまうが、これは放電管の特性である。なお筆者は以上の現象の他、R-1131C では使用時間が長くなれば出力が次第に赤味を増すこと (ただし Roufs, 1972 は、寿命の直前まで出力の特性は変化しないと述べている)、また使用時間の長いものでは、1 時間程度の実験中に出力が赤みを増す場合があることなども経験しており、この光変調放電管を研究で使用していた他の複数の研究者からも同様の報告を受けている。

光変調放電管は、ある程度管内のガスをイオン化しておかないと安定した放電が期待できないので、暗黒内で放電させる場合には、管に外部から紫外線を照射するか (Bruder & Kietzman, 1973; Jacobson, 1958; Matin, 1964; Novak, 1965; Stecher, Sandberg & Minsky, 1970)、あるいは数-数百 μA 程度の電流を流し続けておく必要がある (Engel & Howat, 1966, ただし渡邊, 1975 は、0.5-2 mA 程度の電流を流しておくことが必要と述べている)。この場合、クレータが常時赤く発光した状態となるが、これはレンズ等の光学系や ND フィルタにより容易にマスクできるので、暗順応眼に刺激を提示するような場合でも実用上問題とはならない。

光変調放電管の応答速度は高く、管内のガスが十分にイオン化されている場合、出力パルスの立ち上がり・立ち下がり時間はおおむね数-数十 μs であり、信号電圧が印加されてから出力が生じるまでの時間は数十 μs 以下である。これはガスのイオン化がなされていない場合には数百 ms に及ぶ場合もある。なお、光変調放電

管は放電時にパチッというかすかな音を発生する。これは 1 個のパルス光または数個程度のパルス光列を提示する場合には全く問題にならないが、高周波数でパルス光列を提示する場合にはこの音がかなり大きくなり、周波数変調時には音の高さも変化するため、実験の目的によってはこの音をマスクする必要がある。

R-1131C のピン数は 8 本であり、底面中央の突起の横のふくらみを下に見、その左のピンを 1 として時計回りにピン番号を数えた場合、第 3 ピンがカソード、第 7 ピンがアノードである。1B59/R-1130B のピンは 2 本で、R-1131C の第 3 ピン、第 7 ピンに相当する位置のピンがそれぞれカソードとアノードである (NEC 製の 1B59/R-1130B のピン数は 8 本で、第 3 ピンがカソード、第 7 ピンがアノードである)。

視覚実験での光変調放電管駆動回路図としては、古いものでは Berger, Mahneke and Mortenson (1955), Buckman-Olsen & Rosenfalck (1957), Engel & Howat (1966), 中山 (1957), Roush and Hamburger (1948) などのものが、また比較的新しいものでは, Cavonius & Bauer (1982), 荻阪 (1980), Rogowitz (1986) のものなどがある。

真空管は一般に複数の工場での分業により手作業で製造されたものが多く、光変調放電管も例外ではない。従って細かな電気的特性の他、基部に印刷されている文字の大きさや文字色、ガラス管の長さ、基部に対するガラス管の角度、放電部の傾きなどの点で個体差が大きい。光変調放電管をマックスウェル視光学系の光源として用いるには、特にガラス管の長さや傾き、放電部の傾きなどに基づいて、若干の選別ないし固定時の工夫を必要とする場合がある。なお R-1131C のクレータの直径は 2.36 mm である。

この項は、滝浦 (2003) の光変調放電管に関する記述に大幅に加筆したものである。

Summary

The Maxwellian-view Optical System

Takayuki Takiura

The Maxwellian-view optical system has been widely used for the research on human vision, especially for the color vision and the temporal vision. In the present paper, characteristics of the components of the optical system were described and some tips for constructing the optical system were also given.