可搬形分光放射輝度計の開発†

正会員 戸沢 均* 藪崎 憲司* 野田 啓* 伊藤 隆*

1. 序 論

各種光源やディスプレイの評価を行なう場合、単に輝度や色度座標ばかりでなく、分光分布まで必要とされることも多い。

また、フィルタ方式の色彩輝度計よりも高精度に輝度や色度座標、ひいては相関色温度を求めたい場合もある。分光測光装置というと一般に大がかりなものが多く、本体以外に外部コンピュータ（TSS端末、あるいはパーソナルコンピュータなど）、標準光源、直流安定化電源などが必要であるため、必然的に据え置き形となり、暗室に持ち運べる被測定物以外は測定できないことになる。また入射光学系は、被測定物からの光を白色拡散板（硫酸バリウム圧着面など）で一度受け、その拡散板の輝度を測定するようになっている場合が多いため、微小面の遠隔測定ができないものが大半である。

今回、一体形の分光放射輝度計を開発したので、その原理、機能、性能について報告する。

2. 測 定 原 理

分光測光の原理に関しては各種文献^{1)~4)}があるため、ここでは簡単な説明にとどめる。図1に分光放射測定 の原理を示す。分光放射輝度あるいは、分光放射照度のいずれかを測定するかによって決まる光学系の後方に、モノクロメータを配置して単色光を取り出し光電素子で受光する。設定波長 λ における光電素子の出力（以下、光電出力とい

う）は、光学系の分光透過率 $\tau(\lambda)$ 、光電素子の分光応答度 $s(\lambda)$ の影響を受けることになるが、分光放射輝度 $L_r(\lambda)$ のわかっている輝度標準面（この面は、標準光源Aと硫酸バリウム圧着面の組み合わせによる）をあらかじめ測定することによって、それらを相殺する。

すなわち、輝度標準面に対する光電出力 $D_r(\lambda)$ は、

$$D_r(\lambda) = a \cdot L_r(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda) \dots\dots\dots (1)$$

また、試料面に対する光電出力 $D_m(\lambda)$ は、

$$D_m(\lambda) = a \cdot L_m(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられるので、試料面の分光放射輝度 $L_m(\lambda)$ は、

$$L_m = L_r(\lambda) \cdot D_m(\lambda) / D_r(\lambda) \dots\dots\dots (3)$$

で求めることができる。

$\tau(\lambda)$, $s(\lambda)$ の値が、輝度標準面測定時と試料面測定時とで変化しないような工夫をすれば、式(3)における $L_r(\lambda)$ の値をROMに、 $D_r(\lambda)$ の値を不揮発性RAMに記憶させておくことによって、以後は輝度標準面を用いることなく、試料面の分光放射輝度測定が可能となる。

ここで一つ検討を要するのは、スリット波長幅および測定波長間隔などをどの程度の値とするかということである。この問題に関しては、分光分布の測定の目的によって異なり、(1)光源の発光機構を究明するために分光分布の微細構造を調べる場合、(2)測光量、三刺激値のような放射エネルギーの波長に対する重荷積分値を求める手段として測定する場合とで分けて考えなくてはならない¹⁾。本装置においては、(2)の場合を対象としているため、JISに準拠して、スリット波長幅および測定波長間隔は5nmとした。

3. 各 部 の 構 成

本装置の外観を図2に示す。

図1 分光放射測定 の原理

† Development of a Portable Microprocessor-Controlled Spectral Radiance Meter

* 東京光学機械株式会社 Hitoshi Tozawa Kenji Yabusaki
Akira Noda, Takashi Ito

本稿の一部は昭和61年度照明学会全国大会で発表した。

図2 本装置の外観

図 3 光学系配置図

3.1 光 学 系

図 3 をもとに光学系の説明を行なう。被測定物からの光は、シャープカットフィルタ、対物レンズを通過し、アパーチャミラー（開口の開いたミラー）上に結像する（シャープカットフィルタは、高次の回折光をカットする目的で装着されている）。開口上の像は、リレーレンズによりモノクロメータの入射スリット上に結像される。モノクロメータから出射した光は、シリンダリカルレンズで集光され光電素子に到達する。開口絞り（固定絞り）は、被測定面を距離を変化させて測定しても測定値が変わらないようにする（光電素子に入射する光の量を変えないようにする）ためのもので、輝度計の基本原理を満足させるためのものである。また、開口絞りとモノクロメータ内の非球面ミラーは、共役な位置関係としているが、これは開口絞りを通過した光がけられることなく、上記非球面ミラーに到達させるようにしたためである。

モノクロメータは、分散素子として、ホログラフィックグレーティングを用いたファスティ・エバート形のシングルモノクロメータである。グレーティングの回転は、サインバーによって行なっているため、シャフトの回転角と設定波長の関係はリニアーとなっている。設定波長の読み取りは、シャフトと連動したポテンシオメータによって行なっている。

3.2 電 気 系

被測定面の輝度レベルと受光面に入射する光の量を検討した結果、他の光電素子に比べて格段に検出感度の高い光電子増倍管（以下ホトマルという）を使用することとした。ホトマルの場合は、応答度の安定性の点で問題があるため、後述するような応答度補正機能を内蔵させている。演算増幅器には、高入力インピーダンス、低入力バイアス

電流その他の理由により、FET 入力形のものを採用した。

図 4 に電気系のブロックダイアグラムを示す。システム全体は 8 bit のマイクロプロセッサによってコントロールされている。ROM の中には、プログラム以外に、標準の光 A の輝度 100 cd/m^2 での分光放射輝度、等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, および CIE 1960 UCS 色度図 (uv 色度図) における完全放射体の色度座標、および等色温度線の傾きなどの数値テーブルが格納されている。EEPROM (不揮発性メモリ的一种) の中には、前記の $D_r(\lambda)$ や測定レンジ間誤差補正係数、測定角間誤差補正係数、前記ポテンシオメータの出力と設定波長の関係式、その他、後述するホトマルの応答度補正に用いられる各種データなどが格納されている。

A/D コンバータは、50/60 Hz の商用周波数で点灯したランプに対しての平均値応答、およびハムに対する耐ノイズ性という観点から積分形のものを採用し、積分時間は 100 ms とした。

測定結果は、16文字×4行の LCD ドットマトリクス表示モジュールでスクロール表示させている。またプリンタに印字させることも可能である。

また、パーソナルコンピュータとの接続を考慮して計測器の標準インタフェースである GP-IB (IEEE-488) インタフェースを内蔵させている。

3.3 ソフトウェア

(1) 各種演算機能

分光放射輝度のデータから、さまざまな量を演算によって求めることが可能であるが、本装置では以下の量を算出している。

放射輝度、輝度、XYZ 表色系における三刺激値および色度座標 (x, y) , (u', v') , 相関色温度ならびに黒体軌跡からの距離。

これらの演算における各データは、4 バイト長の浮動小数点データとして扱われている。

上記の量以外、たとえば $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系における値や演色評価数等について必要な場合は、さきに述べた GP-IB を介して、分光放射輝度のデータを外部のパーソナルコンピュータで受け、演算処理することとなる。

(2) 割 算 機 能

本装置は、試料 3 個分のデータを格納するメモリ（メモリ A、メモリ B、メモリ C）をもっている。新しく測定したデータはメモリ A に格納される。一方、キー操作により

図 4 電気系ブロックダイアグラム

メモリ A の内容をメモリ B にブロック転送する、あるいは、メモリ A の内容をメモリ B の内容で割算した結果を、メモリ C に格納するという機能をもっているため、分光放射輝度率や分光透過率の測定を行なうことも可能である。

(3) 校正機能

本装置は、分光放射輝度標準面（標準光源 A と硫酸バリウム圧着面の組み合わせによる）により目盛定めされているが、使用者自身の所有する標準面で校正することも可能である。ただし、標準面は標準の光 A の分光分布を持ち、その輝度は 100 cd/m^2 であることが必要条件である。校正データ ($D_r(\lambda)$ など) は、前述の EEPROM に格納される。使用者による校正が行なわれた後でも、最初に行なった校正データは残っているため、必要に応じて読み出して使用することもできる。

他の標準（たとえば分光放射照度標準電球など）によって校正を行なう場合には、前述の GP-IB インタフェースを介して分光放射輝度のデータをパーソナルコンピュータに転送し、パーソナルコンピュータ側で補正することにより校正可能である。

4. 応答度補正機能

式(3)が成り立つためには、輝度標準面測定時と試料面測定時とで $\tau(\lambda)$, $s(\lambda)$ が変わってはならない。

$\tau(\lambda)$ については、それほど大きな変動はないとみても問題はないと考えられるが、分光応答度 $s(\lambda)$ の変動はホトマルの場合、無視できないため、何らかの補正が必要となる。

齊藤⁵⁾によれば、シリコンホトダイオード（以下 SPD という）は、経年変化が 0.2% ときわめて良好であり、測光標準を標準電球で維持している現状よりも、SPD を使用した標準受光器による測光標準のほうがむしろ精度が向上するという。われわれはこれに着目し、SPD を用いたホトマルの簡易的な応答度補正を考えた。以下にその原理を述べる。

図 5 応答度補正機構

図 5 に示すように、内部に LED を取り付け、その光をホトマルおよび SPD で受光する。ホトマル、SPD とともに応答度が安定であれば、LED の劣化に関係なく両者の出力比は一定となるはずであるから、一定にならない場合は、ホトマルの応答度が変化したためと考えると、ホトマルの出力に対して以下の式で与えられる補正係数 K を乗じる。

$$K = \left(\frac{D_{pt}/D_{st}}{D_{p0}/D_{s0}} \right)^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 D_{p0} : LED に対するホトマルの出力（目盛定め時）

D_{s0} : LED に対する SPD の出力（目盛定め時）

D_{pt} : LED に対するホトマルの出力（試料面測定時）

D_{st} : LED に対する SPD の出力（試料面測定時）

この種の簡易的な応答度補正は、従来、小型電球を使用するなどして、光源をリファレンスとして用いることが一般的であった。本方式は、光電素子をリファレンスとしているため、電球に比べてはるかに扱いが容易で、長期にわたって使用できるといったメリットをもつ。

なお SPD の応答度は、経時変化は小さいが温度特性をもつため、IC 温度センサを内蔵させることにより、その補償をデジタル的に行なっている。また本方式においては、LED の相対分光分布・配光特性、およびホトマル・SPD の相対分光応答度の変化は十分小さいと仮定している。

5. 性能評価

各種性能項目の中から代表的な項目について、試験結果を述べる。

5.1 波長精度

水銀 (404.7, 435.8, 546.1, 578.0 nm)、ナトリウム (589.3 nm)、カドミウム (643.8 nm)、ネオン (703.2, 724.5 nm)、アルゴン (394.9, 451.1 nm) の各スペクトル線を用いて波長精度試験を行なった。

図 6 波長精度

図 6 は、横軸に波長 λ (nm)、縦軸に波長誤差 $\Delta\lambda$ (nm) をとって示したものである。測定波長域全体にわたって、 $\pm 1 \text{ nm}$ にはいっているが、周期的なうねりが見られる。これは、サインバー機構における機構部品の加工精度に起因するものであろうと推測している。

5.2 分光放射輝度・三刺激値の再現性

輝度標準面を日を替えて 9 日間にわたって測定し、分光放射輝度ならびに三刺激値の再現性を調べた。本体の電源

図 7 波長 600 nm における分光放射輝度の再現性

は、試験期間中、終始通電状態とした。図 7 は横軸に時間(日)を、縦軸には試験開始日の測定値を基準値とした場合の分光放射輝度(波長 600 nm)の誤差(%)を示しているが、SPD によるホトマルの応答度補正が良好に機能していることがわかる。

図 8 各波長における分光放射輝度の再現性補正後

図 8 は、各波長 (450 nm, 550 nm, 650 nm) における分光放射輝度の再現性を示したものである。本補正機構は前述したように、ホトマルの応答度の変化を波長ごとに補正しているわけではないので、分光放射輝度の再現性については、波長域によって必ずしも良好な結果が得られないことが懸念されたが、図 8 から判断する限り $\pm 1\%$ 以内であり、それほど大きな差はないように思われる。

図 9 は三刺激値 X, Y, Z の再現性を示したものであ

図 9 三刺激値 X, Y, Z の再現性 (補正後)

図 11 本装置による測定例 (カラー CRT の G, B, R)

る。 $\pm 1\%$ 以内にはいっていること、および X, Y, Z の大小関係が日ごとに崩れていないことから、測色値の再現性も良好であることが判断される。

5.3 色度精度

各種色ガラスフィルタと、標準光源 A の組み合わせによる色光を本装置で測定することによって、色度座標の測定精度を評価した。また比較のために、フィルタ方式の弊社製色彩輝度計 BM-5 によっても測定を試みた。色度座標の基準値については、分光光度計によって測定した各フィルタの分光透過率のデータと、標準の光 A の分光分布をもとに計算で算出した。測定については、図 10 のように標準光源 A と白色板によって輝度 100 cd/m^2 の輝度面を設定し、フィルタホルダ上に各フィルタを順次セットするこ

図 10 測定系配置図

表 1 色度精度

フィルタ名	基準色度座標		本装置		色彩輝度計	
			誤差		誤差	
	x	y	Δx	Δy	Δx	Δy
Y-48	0.4924	0.4596	-0.0002	-0.0006	+0.0036	-0.0046
O-55	0.5907	0.4084	-0.0018	+0.0016	+0.0023	-0.0044
R-61	0.7057	0.2943	-0.0021	+0.0018	+0.0073	-0.0073
V-44	0.1425	0.0590	+0.0008	+0.0001	-0.0175	-0.0060
B-46	0.1636	0.3236	+0.0004	-0.0025	-0.0126	-0.0116
T-44	0.3404	0.3596	+0.0012	+0.0007	-0.0074	-0.0056
G-54	0.2937	0.6635	-0.0006	-0.0003	-0.0137	+0.0165
A-73B	0.5522	0.4314	-0.0011	+0.0004	+0.0048	-0.0054
IRA-05	0.3854	0.4230	-0.0006	-0.0006	-0.0054	-0.0060

とによって行なった.

下記範囲内において表示値の±4%以内

測定角 0.2°の場合 1,000~300,000 cd/m²

100 倍のメッシュフィルタを外付けすることにより、上

 $(W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1})$

厳密に測定範囲を規定したもの（メッシュフィルタなし）が表 2 であるが、相対分光分布と輝度から分光放射輝度を算出するのはかなり煩雑であり、実際に被測定物を測定してみたほうが早いといえる。われわれの経験によれば、CRT の RED を測定角 2° で測定する場合には、メッシュフィルタが必要である。

- (1) JIS Z 8724「光源色の測定方法」
- (2) 中川靖夫：放射の測定，産業計測標準委員会資料（昭47）
- (3) 渡会吉昭：分光放射測定的一般化に関する基礎的原理，照
学誌 **61**（昭52）376
- (4) 佐土根，渡会：「分光放射測定」，応用分光学 ハンドブッ
ク，朝倉書店
- (5) 齊藤一郎：受光器の実用測光標準の設定に関する研究，電
子技術総合研究所報告，第803号（昭54）

(受付1986年12月19日)

可搬形の分光放射輝度計を開発した。本装置を使用することにより、専門の機関以外でも簡単に分光測光が行なえるようになった。また、従来の据え置き形の分光放射計では測定が困難であった微小面の遠隔測定が可能となった。シリコンホトダイオードによるホトマルの応答度補正はきわめて良好に機能し、輝度再現性を $\pm 0.4\%$ 以内に向上させることができた。色度座標の測定精度は、特定の色光に対して $\Delta x = -0.0021 \sim +0.0012$, $\Delta y = -0.0025 \sim +0.0018$ であり、可搬形の分光放射輝度計として、または色彩輝度計の基準器としての活用が期待できる。

おわりに、本装置の開発に対していろいろとご助言、ご協力いただいた株式会社東芝総合研究所の森礼於博士、ならびに特別研究室の富永守氏に感謝の意を表します。

紙面のつごうにより本装置の輝度測定範囲、直線性について言及することができなかったため、ここに最終結果だけ追記する。本装置は、分光測光するため単に輝度で測定範囲を規定することはできない。なぜなら輝度 100 cd/m^2 といっても等エネルギー白色光を測定する場合と、ナトリウムランプのような輝線スペクトル光源を測定するのでは状況が全く異なるからである。したがって、光源を標準光源 A に限った場合について記すこととする。

分光放射輝度の精度（直線性）