

X-Y レコーダによる配光曲線の自動測定

大 島 利 彦, 関 山 正 憲

Automatic Measurement of Distribution Curve of Light by X-Y Recorder

Toshihiko ŌSHIMA Masatoshi SEKIYAMA

Abstract: — This paper deals the distribution curve tracer of light which uses a X-Y recorder.

In our device, the luminous intensity from the fluorescent lamp which is measured is changed into a electric current by a selenium photocell and send to an amplifier which contains a galvanometer and two CdS cells.

The output voltage from the amplifier is send to a function generator which is connected with the shaft of measuring fluorescent lamp and produces two signals to the X-Y recorder.

About the response character of the amplifier, we discussed in detail.

1. ま え が き

光源や照明器具の特性の一つとして、その配光曲線は重要な意義をもっている。

したがってこれが要求せられることは、しばしば生ずる。この配光をもとめるには従来から視感測光法がよく用いられるが、これは時間の損失が多いので、これに代るものとして、最近は自動測定法が研究されている。

この実験も自動測光の一方法で、物理測光法を用い、低照度測定用ガルバアンプと、光源回転軸に連動させた関数発生器の出力を X-Y レコーダに導入し、配光曲線を簡単に描画させようとするものである。

2. 測定装置の概要

装置の概要は図 1 に示す如きものである。

光源支持台はけい光灯を水平に回転できるように装置して、この回転軸に sine cosine の関数を発生するポテンシオメータを連動できるようにとりつけた。光源は手動で適当な

速さで回転して実験したが、将来はモータで駆動する考えである。

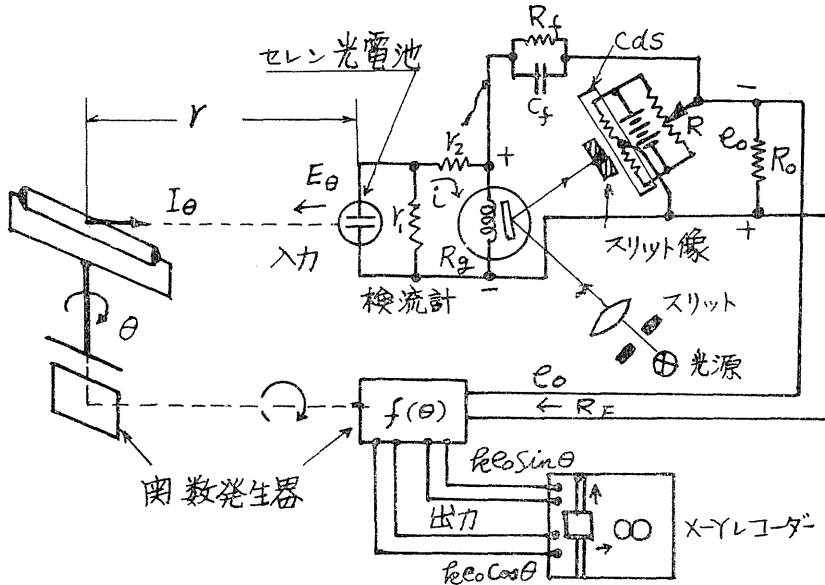


図 1

受光器は視感度補正を行なったセレン光電池を用い、自然昼光を標準にしたものを使った。一般にけい光灯は直線光線であるから、測定上点光源と見なし得る距離は光源の長さの5倍以上はなさなければならないが、実験装置に既設の光度計 bench を利用したため、光源から4倍はなして実験した。(20W けい光灯で約2m)

したがって受光面の照度は低照度になり、光電池の電流は数マイクロアンペアの微小電流である。この電流を増巾するため高感度、高利得のガルバンプ⁽¹⁾を用いその出力を光源回転軸にとりつけた関数発生器に加えると、光源の回転角に対して sine cosine の出力信号が得られる。さらにこの信号を X-Y レコーダに接続すれば配光曲線が記録できる。

2.1 照度検出部

光電池を使用した低照度計は一般に Cambell-Freeth 回路が用いられている。

この照度計の特徴は光電池から見た入力抵抗が常に0になるような回路方式で短絡電流を測定しているのであるが、外部抵抗が0~50Ωの範囲内では照度と光電流の関係は直線になり、比較的精密な照度の測定に適當している。これにかわって最近ではガルバンプに負帰還をかけた方式や、自動平衡式のものもつくられている。

我々が実験した照度検出回路は、けい光灯からの微小照度をセレン光電池で受け、この光電流を高感度、高利得のガルバンプで増巾する方法である。増巾器は検流計を介してあるため、検流計の運動に支配され、高感度ではあるが応答が非常におそい。

このおくれをフィードバックによって補償すると同時に光電池の外部抵抗を少なくして、Cambell-Freeth 回路の条件を満足させ、出力光電流の直線性をはかった。

ガルバンプは反照形検流計のスケール上のスリット像の動きを CdS ブリッジに入射させて、その不平衡電流を検出、出力電圧に変換する。

2. 2 ガルバアンプの特性

図1はガルバアンプの構成をしめす。

光電変換素子として, CdS 素子の入った双子形の箱を検流計のスケールの前面にとりつけ, 検流計のミラーに反射したスリット像を CdS 素子の中央点にむすばせ, CdS 抵抗と可変抵抗 R でブリッジを形成する。

検流計の入力が 0 のときブリッジの出力電流が 0 になるように, あらかじめ光学系と可変抵抗 R を調整しておく。

次に入力側に電流が流れるとスリット像が左右いずれかに移動し, ブリッジのバランスがくずれ出力端に大きな電圧があらわれる。

この不平衡電圧の大きさはガルバアンプ全体の増巾度に関係するので, CdS 素子の抵抗に比較し可変抵抗 R の値を充分小さく選び 500Ω とした。さらに電池電圧を 6V にした。

この場合, 増巾器の出力抵抗は関数発生器の入力抵抗となるが, $10k\Omega$ あり, 出力端子から見たブリッジの内部抵抗にくらべて高抵抗である。そこで並列に $1k\Omega$ の抵抗を挿入して結合をよくした。図2はガルバアンプの等価回路をしめす。帰還をかけない場合の電圧増巾度 A は

$$A = \frac{e_0}{e_i} = \frac{e_0}{iR_g} \dots\dots\dots (1)$$

ここに i は検流計の入力電流で, スケールのふれを d, 電流感度を K_2 とすれば

$$e_i = dK_2 R_g \dots\dots\dots (2)$$

ただし R_g は検流計の線輪抵抗である。

故に
$$A = \frac{e_0}{dK_2 R_g} \dots\dots\dots (3)$$

であらわされる。

次に帰還をかけた時の電圧増巾度 A' は

$$A' = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{1}{\beta} \dots\dots\dots (4)$$

$(1 \ll A\beta)$

ここに

$$\beta = \frac{R_g}{R_f + R_g} = \frac{R_g}{R_f} \dots\dots\dots (5)$$

$(R_f \gg R_g)$

であらわされ, これを帰還率といっている。

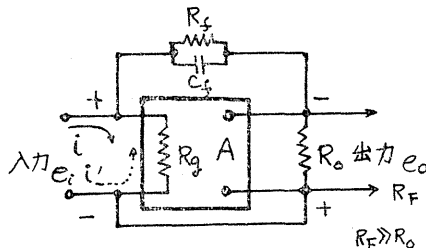


図 2

図3は自動測光装置のブロック図をしめす。

ここに、

- | | | |
|------------------|------------------|---------------------|
| I_0 : けい光灯の光度 | r : 光源と受光器の距離 | E : 受光面の照度 |
| K_1 : 照度定数 | i : 検流計電流 | c : 検流計のトルク定数 |
| I : 検流計の慣性能率 | k : 制動定数 | τ : 吊線のねじれ定数 |
| K_2 : 検流計の感度定数 | A : ガルバアンプの増巾度 | θ : 光源の回転角 |
| k : 関数発生器の比例定数 | T : 微分回路の時定数 | θ_g : 検流計のふれ |

角である。

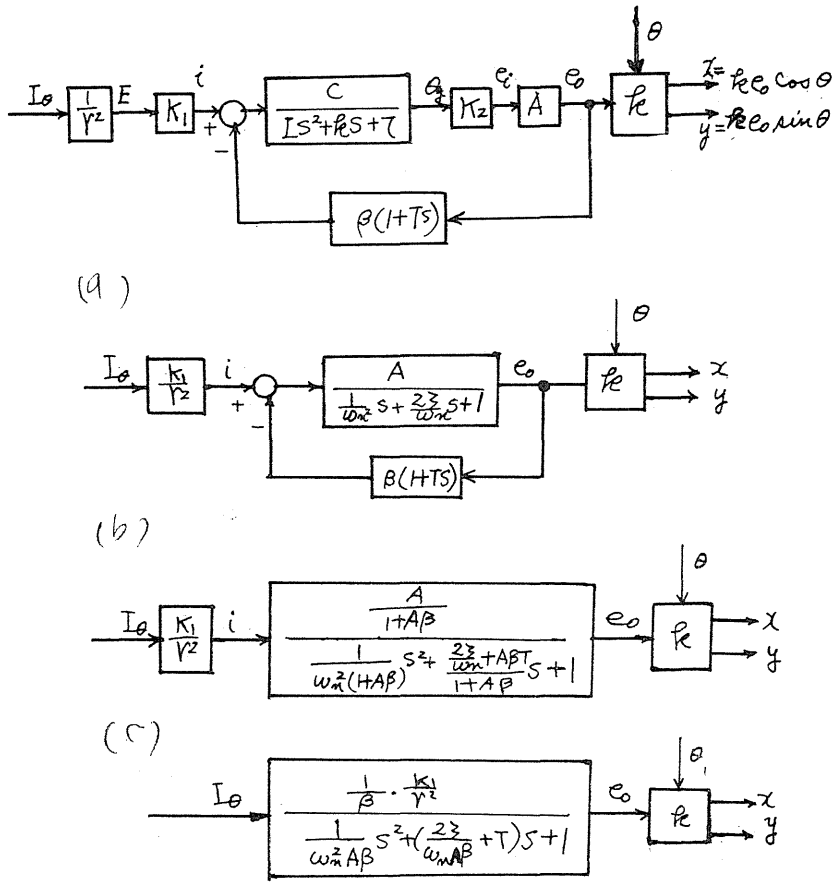


図 3

検流計は代表的二次おくれ要素であるから、その伝達関数は

$$G(S) = \frac{\theta_g(S)}{i(S)} = \frac{c}{IS^2 + kS + \tau} \dots\dots\dots (6)$$

でしめされる。(6) 式の右辺を τ で除し、固有周波数 $\omega_n = \sqrt{\frac{\tau}{I}}$ を代入すると、

$$G(S) = \frac{c/\tau}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} S + 1} \dots\dots\dots (7)$$

ただし $\xi = \frac{k}{2\sqrt{\tau I}}$: 制動率

$$\xi = 1 \dots\dots\dots k' = 2\sqrt{\tau I} \text{ (臨界的ふれ)}$$

$$\xi < 1 \dots\dots\dots k' < 2\sqrt{\tau I} \text{ (振動的ふれ)}$$

$$\xi > 1 \dots\dots\dots k' > 2\sqrt{\tau I} \text{ (非振動的ふれ)}$$

で表わされる。

いま検流計の偏れ θ_g が, K_2, A と電圧に変換, 増巾されると,

$$G_1(S) = \frac{e_0(S)}{i(S)} = \frac{\frac{c}{\tau} K_2 A}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} = \frac{A}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} \dots\dots\dots (8)$$

ただし $\frac{\tau}{c} = K_2$ である。この (8) 式はいわゆる オープンループの伝達関数で, A 倍ゲインが上ることをしめしている。

実験では $\xi = 1$ の条件で測定したが, それでも応答がおそく, 図3-(b) のようにフィードバック補償回路 $G_2 = \beta(1 + TS)$ を挿入して, 応答の改善をはかった。この時のループ伝達関数 G_0 は

$$G_0 = \frac{G_1}{1 + G_1 G_2} = \frac{A / \left(\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1 \right)}{1 + \frac{A\beta(1 + TS)}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1}} = \frac{\frac{A}{1 + A\beta}}{\frac{1}{\omega_n^2(1 + A\beta)} S^2 + \frac{\frac{2\xi}{\omega_n} + A\beta T}{1 + A\beta} S + 1}$$

となる。

ここで測定条件から $\xi = 1, A\beta \gg 1$ とおくと

$$G_0 = \frac{1/\beta}{\frac{1}{\omega_n^2 A\beta} S^2 + \left(\frac{2}{\omega_n A\beta} + T \right) S + 1} \dots\dots\dots (9)$$

のようにならわされる。

(9) 式から明らかなように, フィードバック補償を行った結果, ガルバアンプのゲインは $\frac{1}{\beta}$ に減少するが, 固有周波数は $\sqrt{A\beta}$ 倍になり, 固有周期はいちじるしく短くなる。また制動係数は $\frac{2}{\omega_n A\beta} + T$ となり前より減少することが考えられる。

さらに検流計の入力抵抗

$$R_i = \frac{R_g}{1 + A\beta} \approx \frac{R_g}{A\beta} \approx \frac{R_f}{A} \dots\dots\dots (10)$$

となり検流計抵抗に無関係となり非常に小さくなる。

定常状態のガルバアンプのゲインは (4) 式と同じように (9) 式で $S=0(t=\infty)$ とおいて

$$G_\infty = \frac{1}{\beta} \approx \frac{R_f}{R_g} \dots\dots\dots (11)$$

で表わされ, 増巾器に無関係である。

2-3 関数発生装置

フィードバック補償の結果, 充分安定化されたガルバアンプによって増巾された光電流

は関数発生器に加えられる。

いま、けい光灯の回転角に対して、関数発生器の2つの出力 (sine cosine) を考えて見よう。

けい光灯の配光をあらわす式は図4の如く灯軸の鉛直方向の光度を I_0 とすれば近似的に

$$I_\theta = I_0(a \cos \theta + b \sin \theta) \dots\dots\dots (12)$$

で表わされる。ここに $a+b=1$ で普通のランプに対して $a=0.6\sim 0.5$ $b=0.4\sim 0.5$ の値をとる。図3-(d)のブロック図から、回転角 $\theta = \theta_1$ における出力電圧は、

$$e_0 = e_{\theta_1} = \frac{K_1}{r^2 \beta} I_{\theta_1} \dots\dots\dots (13)$$

ただし定常状態の場合である。

しかるにこの電圧 e_{θ_1} に対して関数発生器の出力は、

$$\left. \begin{aligned} x &= k e_{\theta_1} \sin \theta_1 = \frac{K_1 k}{r^2 \beta} I_{\theta_1} \sin \theta_1 \\ \frac{K_1 k}{r^2 \beta} &= A'' \text{ とおくと} \\ x &= A'' I_{\theta_1} \sin \theta_1 \\ \text{同じく } y &= A'' I_{\theta_1} \cos \theta_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。

この電圧を X-Y 記録計に加えると記録計は図5のように、円の動径 r が光源の θ 方向の光度、 I_θ に常に比例した大きさで円を描くように、動作し、入力 I_0 の変化にしたがって動径 r が移動、かつ追跡し、配光曲線を描くことになる。

すなわち

$$\left. \begin{aligned} r^2 = \overline{OP}^2 = x^2 + y^2 &= (A'' I_{\theta_1})^2 (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) \\ r'^2 = \overline{OP'}^2 = x'^2 + y'^2 &= (A'' I_{\theta_2})^2 (\sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

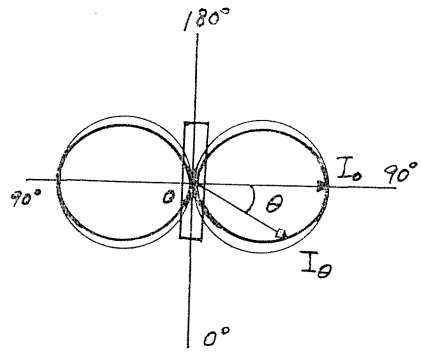


図 4

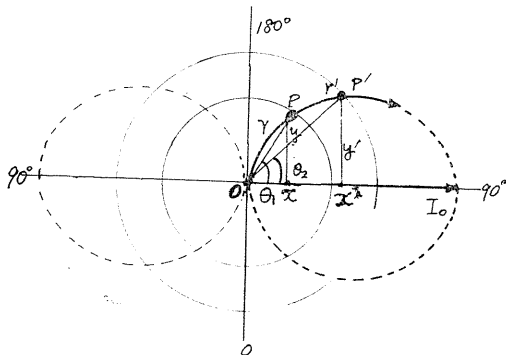


図 5

3. 実験結果

3-1 ガルバンプの特性

実験に使用した検流計は次のような特性である。

D-2 L形 Y. E. W

- 線輪抵抗…………… 310Ω
- 外部臨界制動抵抗 …… 1000Ω
- 電流感度…………… 4.2×10^{-8} A/mm
- 電圧感度…………… 5.4×10^{-6} V/mm
- 周 期…………… 2 秒

図6は定常特性をしめす。

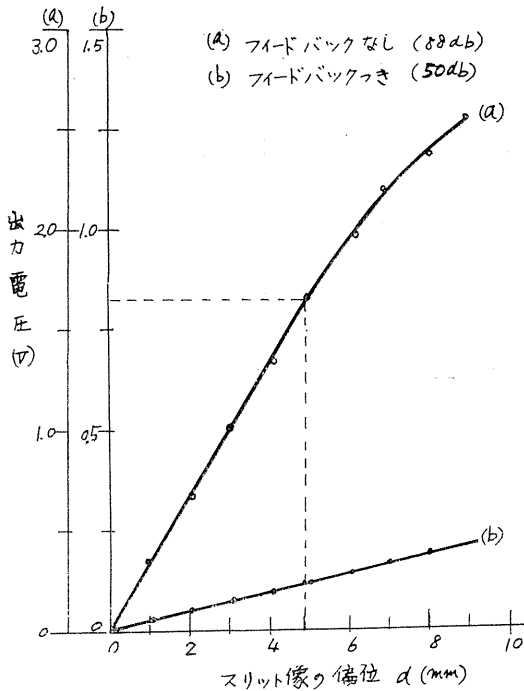


図 6

$$\beta = \frac{R_f}{R_g} = \frac{10^5}{310} = 320$$

ただし $R_f = 100K\Omega$ である。

故に $A' = 320$ 、また db では $50 [db]$ となる。

前よりも $38db$ だけ減少するが、直線性は、はるかによくなっている。図7はガルバンプのインディシャル応答を X-Y レコーダで記録、これを模写したものである。(a)は無帰還時の応答で検流計は臨界制動条件 $\xi = 1$ の状態である。図から時定数をもとめると約1秒になる。

(b)は帰還時のインディシャル応答を拡大して(a)と比較したもので、応答時間を早くするため、立上りに若干の行きすぎが見られるが、制動率 ξ_0 の値は大体0.3ぐらいに設計した。この制動率 ξ_0 と帰還回路の時定数 T との関係は次のようにしてもとめることができる。

いま(8)式と(9)式を対応すると、

$$\omega_0^2 = \omega_n^2 A\beta \dots\dots\dots (15)$$

(a)は無帰還のとき、(b)は負帰還をかけたときの特性である。いま両曲線から A, β をもとめて見よう。検流計のスリット像の偏位 $d = 5 \text{ mm}$ 以下は直線範囲であるから、この点について、無帰還時では検流計の入力電圧

$$V_i = K_2 d R_g = 4.2 \times 10^{-5} \times 5 \times 310 = 6.5 \times 10^{-5} V$$

ブリッジの出力電圧

$$V_0 = 1.68 V$$

$$\therefore A = \frac{V_0}{V_i} = 2.6 \times 10^4$$

これを db で表わすと、

$$20 \log_{10} A = 88 [db]$$

負帰還をかけたときの増巾度 A'

は

$$A' = \frac{V_0}{V_i} = \frac{0.21}{6.5} \times 10^5 = 322$$

また $A' = \frac{1}{\beta}$ から計算すると

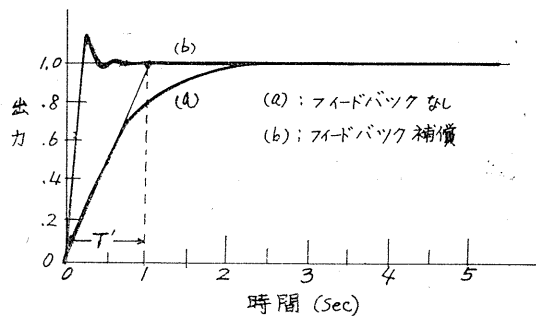


図 7

$$\frac{2\xi_0}{\omega_0} = \frac{2}{\omega_n A\beta} + T \dots\dots\dots (16)$$

$$A_0 = \frac{1}{\beta} \dots\dots\dots (17)$$

ただし ξ_0 , ω_0 はフィードバック補償後の制動率, 固有周波数である。
 (15), (16) 式から

$$T = \frac{2\xi_0}{\omega_n V A\beta} - \frac{2}{\omega_n A\beta} = \frac{2(\sqrt{A\beta}\xi_0 - 1)}{\omega_n A\beta} \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。この式は位相進み回路の時定数 T と制動率 ξ_0 の関係をあらわす。
 (18) 式に定数の数値 ($\omega_n = \pi$, $A\beta = 81$) を代入すると,

$$T = \frac{2(9\xi_0 - 1)}{81\pi} = 7.85 \times 10^{-3}(9\xi_0 - 1)$$

のようになる。この数値計算の結果を表にまとめると,

ξ_0	T (sec)	C_f (μF)	
0.2	0.00625	0.063	$R_f = 10^5 \Omega$
0.3	0.0133	0.13	
0.4	0.0203	0.2	
0.5	0.0274	0.27	
1.0	0.0625	0.6	

表 1

表1より制動率 $\xi_0 = 0.3$ にするためには, フィードバック回路の時定数 $T = 0.0133(sec)$, すなわち $C_f = 0.13\mu F$ が必要である。

実験では $0.1\mu F$, ($T = 0.01$) を入れたが, C_f , R_f の誤差の影響も考えられる。

また帰還後のガルバンプの周期は

$$T' = \frac{T_0}{V A\beta} = \frac{2}{\sqrt{81}} = \frac{2}{9} \approx 0.2sec$$

入力抵抗

$$R_i = \frac{R_g}{A\beta} = \frac{R_f}{A} = \frac{10^5}{2.6} \times 10^{-4} \approx 3.9\Omega$$

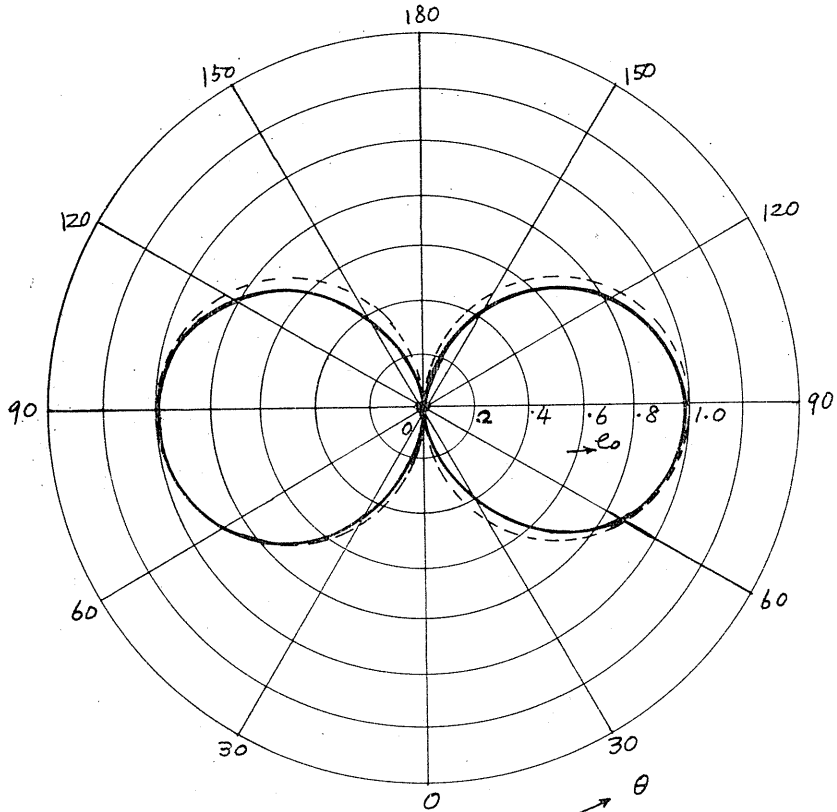
したがって光電池回路の外部抵抗 R_x は図1から

$$R_x = \frac{r_1(r_2 + R_i)}{r_1 + r_2 + R_i} = \frac{50 \times 703.9}{50 + 700 + 3.9} = 46.7\Omega$$

となり光電池の特性に影響しないことがわかる。ただし $r_1 = 50\Omega$, $r_2 = 700\Omega$ である。

3-2 配光曲線の描画

関数発生器の出力を X-Y レコーダーに接続し, 光源の鉛直角 θ を手動でゆっくり回転すると図8のように光軸の双方に広がる配光曲線が描ける。



$$e_0 = 1.0 \text{ V}$$

$$E_0 = 18 \text{ lux} \quad r = 2 \text{ m}$$

$$\therefore I_0 = r^2 E_0 = 72 \text{ cd}$$

図 8

点線の正円からわずかにはずれて、大体けい光灯の配光曲線に近いが、実際は曲線上にこまかいおとつが見られる。図8は記録を模写したものである。配光曲線が左右対称でないのは、光源支持台のレベルが完全でないためと思われる。

図の I_0 方向の電圧は $e_0 = 1 \text{ V}$ 、光電池面の照度 $E_0 = 18 \text{ ルクス}$ の時である。

光源からの距離が 2 m だから

$$\text{光度} \quad I_0 = r^2 E_0 = 4 \times 18 = 72 \text{ cd}$$

光束の近似計算式 $F_0 = 9.3 I_0$ (JIS)

を用いて計算すると $F_0 = 9.3 \times 72 = 670 \text{ ルーメン}$

また山内氏の近似計算式

$$F_0 = 2.1(I_{30} + I_{60} + I_{90} + I_{100} + I_{120} + I_{150})$$

を用いれば

図8の電圧目盛を補正して

$$F_0 = 2.1 \times (4.46 \times 72) = 675 \text{ルーメン}$$

JIS 規格の計算式と大体近い値である。

実験に供したけい光灯は 100V20W 自然色で、初期規格の光束は 700 ルーメンであるが、ガルバンプの調整、および光源電圧の変動等による測定誤差の影響も考えられる。

ここで測定上注意しなければならないのは光源の回転速度をガルバンプの応答速度以上にまわさないことで、特にけい光灯の光軸から、鉛直方向へ向っての立上りは光度が急変するので忠実な配光の描画ができなくなる。

またこの実験で測定距離を 2m はなして行ったが、点光源としての取扱いにどれくらい誤差を生ずるか検討してみた。

けい光灯を直線光源としてとりあつかった照度の計算式は、図9から、

$$E = \frac{I_0}{x^2} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{a}{x} \right)^2 + \frac{3}{5} \left(\frac{a}{x} \right)^4 - \dots \right\}$$

でしめされる。⁽²⁾

いま $x=2m$ $2a=0.56m$ だから

$$E = \frac{I_0}{4} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{0.28}{2} \right)^2 + \frac{3}{5} \left(\frac{0.28}{2} \right)^4 - \dots \right\}$$

この式の第2項まで計算すると

$$E \approx \frac{I_0}{4} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{0.28}{2} \right)^2 \right\} \approx \frac{I_0}{4} (1 - 0.0125)$$

やく 1.25% の誤差であるから、実用上、さしつかえないものと思われる。

4. む す び

配光曲線の自動測定法として、光電池、ガルバンプ、関数発生器等で構成した方法を考え、実験を行った結果、所期の目的を達し得た。一般に測定装置は視感的にも物理的にも大規模になるが、この方法は X-Y レコーダの応用測定として、実験室および生産工場等で、数多くの光源の測光試験を行うには便利かと思われる。

また関数発生器を、その他の光源回転装置にとりはずしできるように装置すれば、けい光灯以外の測光にも利用できる。

しかし光度検出要素であるガルバンプは外部振動に対して弱く、この振動がドリフトとして出力側にあらわれ X-Y レコーダの動作を著るしく、不安定にするから、適当な除震法を考えなければならない。

さらに光源ランプの電源安定化も必要であろう。光電変換素子として使用した CdS の特性も充分検討しなければならないが、以上の問題点を今後究明したい考えである。

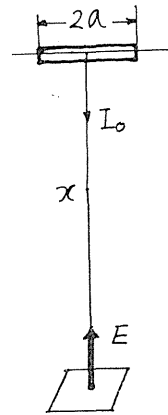


図 9

参 考 文 献

- ①室井，毒島，田中： 昭39，電気四学会連合大会論文集 982 光電池の光電流増巾用ガルバ
ンプ
- ②黒沢涼之助： 最新照明計算の基礎と応用 P 143