照明器具反射板のCAD (1)

専門会員 堀 恒夫* 正会員 松下 信夫*

専門会員 高橋 貞雄*

Computer Aided Design Method to Predict the Luminous Intensity Distribution of Reflector (Part 1)

Tsuneo Hori (Fellow Member) Nobuo Matsushita (Member)

Sadao Takahashi (Fellow Member)

(Research Laboratory Toshiba Electric Equipment Corp.)

ABSTRACT

Few analytical Methods for predicting the luminous intensity of reflector with arbitrary contour have been reported in spite of the optical design being adapted in the A-A section on the perfect specular reflector. This paper describes a few practical application of a new concept which considers the influences of light source size and light reflection properties of the reflectors furnished by the materials in general use.

In general, it is one of very complicated problems to compute the reflected luminous intensity on the reflector from actual light source on account of its shape and size.

We have developed a computer aided design method which consists of some subprograms to sum up the reflected components from each of the part into which the reflector is divided.

A three plates reflector combined with linear source, such as an incandescent halogen lamp and a tubular fluorescent lamp, was made to confirm the degree of consistency between measured values and computed results.

It was found that both results approximately agreed in practical use in many experimental measurements and computations.

1. はじめに

所要の配光が得られるような照明器具の光学設計は、従来からいろいろ試みられているが、それらは皆、反射面が正反射の場合とか、完全拡散反射に近い場合に限られたもので^{1)~3)}、正反射と拡散反射の両成分をそなえたような、一般の材料に適用することは困難であった。

今回作成した電算機用の計算プログラムは、そういった材料の反射特性を考慮に入れた計算によって、配光を

予測するものであるから、白色メラミン焼付け面や、梨地電解研磨面など、一般の材料を用いた器具に適用しても、十分信頼して使用できるものであることが、実測値との照合結果から確認された。

材料の反射特性を計算に取り入れる方法は、試験用器具の測定結果との照合から求めたものである。材料の拡散程度を一つの係数で評価し、反射特性はその係数を含めた近似式に置き換えて表わすという手段を用いた。それによって配光を計算すると、器具の形状や寸法、光源の位置に変化があっても、それに相当する入力を入れて計算すれば、おおむね実測の配光と一致する。また別

* 東芝電材研究所
昭和50年4月照明学会全国大会でこの一部を発表済み。

の材料を使った場合には、その材料の拡散程度に相当する係数を入れて同様の計算を行なうと、やはりほぼ実測の配光と一致することが確かめられた。

試験用器具は、細長いハロゲン電球を用いた 3 平面の反射がさで、反射面 3 枚おのおのの取り換えと寸法や角度、ならびに光源の位置が自由に変化できるようになっているものである。これによって確認された材料の反射特性を取り扱う基本的な考え方をもとに、実際のけい光灯器具、ならびに HID 器具の配光予測計算を行なうまでに発展することができた。

今回の論文(1)はその材料を取り扱う考え方と、それを基にした配光の計算プログラム、ならびに直管形けい光灯器具のような、軸対称長方形の照明器具における A-A 面配光の予測計算について説明し、丸型の HID 器具については、これらと別の計算要素も含まれるので、次の論文(2)で説明することにする。

2. 基本的考え方

2.1 材料の反射特性

図 1 に示すように、反射面の垂線から θ なる角度をもって入射する光束の反射光は、一般にその正反射方向を最大とした反射分布になる。この反射分布の形状は材料によって異なり、たとえば図 2 のように横軸に角度、縦軸が比光度とすると、正反射鏡面の場合が直線だけ、完全拡散面では反射角の余弦に比例する。そして一般の材料は両者の間で、その拡散程度によって定まる形状となる。また、この形が左右対称になるのは垂直入射の場合

図 1 反射の状態

図 2 各材料の反射分布特性
(垂直入射の場合)

図 3 入射角が変わった場合の反射特性

合だけで、実際には図 3 のように正反射方向を頂点とした非対称の分布となる。この各角度の光度計算は電算機で算出するに便利のように下記の数式で表わす。

$$\text{各角度の比光度 } Y = (1 - \sin X)^\alpha \dots \dots \dots (1)$$

$\alpha \dots \dots$ 拡散程度を表わす

係数 (後述)

$$\text{正反射方向より先は } X = X_1 \frac{90^\circ}{90^\circ - \theta}$$

$$\text{正反射方向より手前は } X = X_2 \frac{90^\circ}{90^\circ + \theta}$$

ただし、 X_1, X_2 は正反射方向からの角度。

拡散程度を表わす係数の α は、前述のように試験用器具における照合結果から求めた材料の反射面固有のもので、 α をパラメータとした X と Y の関係を図 4 に示す。 α が大きいほど鏡面に近く、小さいほど拡散面に近い形となる。けい光灯反射がさに使う白色メラミン焼付け板は 0.4~0.8、アルミ梨地電解研磨面はその仕上げ程度によって異なるが、大体 2.0~10.0 の間にはいっている。ただし、このカーブは材料にある角度から平行光を入射させただけの単純な反射分布と違い、直管形けい

図 4 反射特性評価曲線

光灯器具のような、長い形状の器具における A-A 面配光のように、断面に対して斜めにはいって来る光も、すべて含んだ入射光による反射分布特性を表わす。この α は

後でも述べるが、実験から求められたものである。

2.2 配光計算への導入

配光計算にはまず、図 5 のような点光源と一反射平面だけの簡単な場合を想定する。

図 5 光源の放射光と反射光の仮定方法

光源からは、全方向に連続的に光が放射されていると考えられるが、ここではとりあえず、二次元の平面に光源光度に等しい値で、等間隔な角度 ($\Delta\theta$) の光が放射されており、反射光もまた同様であるものと仮定する。

光源から反射面の一点に θ なる角度の入射光 (光度 I_θ) による各方向の反射光度 $I_\theta(\beta)$ の計算は、入射光 I_θ に全反射率 ρ を掛けたものを基準として、図 6 のように(2)式で計算される。

図 6 反射光度の算出

$$I_\theta(\beta) = \frac{Y_\theta(\beta)}{\sum Y_\theta(\beta_i) \Delta\beta} \rho \cdot I_\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 β は材料面の法線からはかった角度

β_i のきざみ $\Delta\beta$ (図 5 参照) は、 90° の公約数で、通常 1° または 2°

$Y_\theta(\beta)$ は、(1)式によって計算される θ 方向から入射した光による β 方向の比反射光度

ここで、一つの反射面において正反射方向よりさきは

$$\beta = \theta + X_1 \quad \dots\dots\dots \beta = \theta + X(1 - \theta/90)$$

正反射方向より手前で反射面と垂直方向までの間は

$$\beta = \theta - X_2 \quad \dots\dots\dots \beta = \theta - X(1 + \theta/90)$$

反射面と垂直方向より光の入射方向側は

$$\beta = X_2 - \theta \quad \dots\dots\dots \beta = -\theta + X(1 + \theta/90)$$

である。

一つの反射面において、 $\beta = \beta_1$ 方向の反射光線は、図 7 に示すように多数ある。

図 7 反射光分布の計算

β_1 方向の反射光度の合計 $I_s(\beta_1)$ は、

$$I_s(\beta_1) = I_\theta(\beta_1) + I_{\theta+\Delta\theta}(\beta_1) + I_{\theta+2\Delta\theta}(\beta_1) + \dots\dots(3)$$

$I_s(\beta_1)$ の計算精度には、 $\Delta\theta$ と $\Delta\beta$ の二つが大いに関係する。まず $\Delta\theta$ を定め、 $\Delta\beta$ を決めるわけであるが、ここでは多くの場合、 $\Delta\theta = \Delta\beta = 1^\circ$ にしている。なぜなら、反射材料の拡散係数は、図 4 に示すように 0.3~10 以上までであることがわかっており、とりわけ鏡面に近い場合には $\Delta\theta$, $\Delta\beta$ が細かいほど精度が高くなる。拡散反射面の場合にはもっと大きくてもよいようである。

2.3 反射がさの配光計算

前記の考え方による配光計算を図 8 の左側に示すような 3 平面の反射がさに線分光源を用いた場合の、光源に垂直方向すなわち A-A 断面の配光計算に応用する。

光源からの光は様々の形態を経て、出力となって現われるが、正反射方向の反射光が 2 回反射するまでを追跡し、その光源出力の範囲を分類すると同図右側に掲げるように①~⑥までの 6 種類となる。

図 8 計算プログラムの分類

図 9 計算手順

そしてそれらの計算手順は図 9 のように、光源からの入射光 I_θ が、図 8 ①の範囲では光源光度がそのまま出力に、②の範囲では [R1] というプログラムで前述のような各角度 $I_\theta(\beta)$ なる反射光度分布を計算し、図の斜線部分を出力とする。この範囲では、他の反射面に当たる部分(図の白地部分)の二次反射光は、計算に入れない。③の範囲では同様に、まず [R3] によって斜線の部分が出力として計算され、白地の部分は [R5] というプログラムによって、二度目の反射光度分布が同様な方法で計算され出力とする。というような方法で④、⑤、⑥も計算し、 $I_\theta(\beta)$ と、 $I_\theta(\beta)$ を入射光とする二次反射光を加えた全成分の計算を行なう。三次反射以降はきわめて少ないので、実際の計算には無視してもよいようである。特に必要な場合は同様な方法で計算を繰り返すだけである。

図 10 計算結果の分析

図 10 は、図 8 のような寸法の器具を各計算プログラムによって算出した比反射光度の合計 ($R1+R2+R3+R4+R5$ の $\theta=0^\circ$ 軸対称左右合計) $Y_s(\theta)$ と、それらの各成分を分析した一例である。 $Y_s(\theta)$ はランプ光度の倍数で、光度の絶対値を出すにはこの値にランプ光度を掛ける。

3. 試験用器具による実験

3.1 拡散係数の決定

試験用器具は図 11 のような構造をしており、前述のように左右の側板は水平移動、ならびに角度調節ができ

図 11 試験用器具 (1.5 kW ハロゲン電球使用)

る。また光源も同様、上下、左右の調節ができる。反射面の側板と上板は、自由に取りはずしができるようにになっており、所要の反射材を入れて配光を測定する。

反射材としては、正反射に近いものとして、アルミ鏡面仕上げ板、半拡散材としてアルミ梨地電解研磨の仕上げ板 5 種 (仕上げの程度が少しずつ異なるもの)、拡散材として、白色メラミン焼付け板 2 種 (仕上げ塗装が少し異なるもの) ならびに白色ケント紙などを用意した。

光源には 1.5 kW ハロゲン電球 (全長 248 mm, 管径 10 mm) を使用した。これは A-A 面 (ランプ軸と直角方向の断面) において、最も点光源に近い状態と考えられるようにすることによって、配光計算を簡易にするためである。

これによる多くの測定結果と計算結果の照合から、前述の拡散程度を表わす係数 α を求め、また(2)章で説明の基本的考え方がほぼまちがっていないことを確かめた。

図 12 (a)~(g) にその一例を説明する。

測定は試験用器具の各部分の分析から行なった。すなわち図 8 のような器具の場合を例にとると、[1]側板片側の光源出力範囲②に相当する部分を残して、他は黒くおおう、[2]天井板の中心から片側だけで他は同様に黒くおおう、[3]両側板だけで他は黒くおおう、[4]天井板の中心から片側だけと片側の側板で他は黒くおおう、および[5]

図 12(a) 側板片側だけの反射分布 ($\rho=0.8$)

 図 12(b) 各実測値と計算値 ($\alpha=4.0$ $\rho=0.8$)

 図 12(c) 反射板の角度を変化させた場合の反射分布 ($\rho=0.8$)

 図 12(d) 光源と天井板との距離を変化させた場合の反射分布 ($\rho=0.8$)

図 12(e) 白色メラミン焼付け板 (つやの少ないもの) を使用したときの反射光の実測値と計算値

全部の反射板を入れた場合である。

いま、図 12(a) に示すⅠ側板片側だけの場合につき説

図 12(f) 白色ケント紙を使用したときの反射光の実測値と計算値

図 12(g) アルミ梨地電解研磨板 (鏡面仕上げに近い仕上げのもの) を使用したときの反射光の実測値と計算値

明すれば、図 8 で示した光源出力範囲の②による反射光を計算するプログラム [R1] を用いて、 α をパラメータとした計算結果に、実測値 (ただし、ランプ直射光①を除く) を入ると、この反射板の α がほぼ 4.0 であることがわかる。

図 12(b) は同様にして、②、③、④、⑤の実測値 (ランプ直射光①を除く) である。②については⑥の範囲の [R2] と⑥の範囲の [R3] で計算される部分の合計、③については②の範囲の [R1] と、③の範囲の [R3]、[R5] で計算される部分の合計が片側の配光であるから、それを $\theta=0^\circ$ で軸対称の左右合計をしたもの、④は②、④、⑤、⑥の全部と、③の [R3] で計算される部分を加え合わせたものについて各計算値と照合し、そして⑤全部の測定値と実測値が合うのを確かめたものである。

また図 12(c) は反射板片側だけで、その傾斜角 (δ) を変えた場合、(d) は同様に光源と天井板の距離 (H) を変化した場合の反射分布の計算値である。

これらはすべて $\alpha=4.0$ としての計算値と、実測値を分析した一例であるが、こういった試験を前記の材料すべてについて、側板の角度、天井板の幅、光源の位置などを変化させて行ない、適当な α を用いて計算すれば、計算値と実測値が、ほぼ合致することを確かめたわけである。図 12(e)~(g) は、それぞれ白色メラミン焼付け板(つやの少ないもの)、白色ケント紙、アルミ梨地電解研磨板の鏡面に近い仕上げのものについての実測値と、計算値を照合した結果の一例である。この試験に使用した反射材料の α は下記のようにであった。

白色ケント紙	0.3
白色メラミン焼付け板	0.48~0.8
アルミ梨地電解研磨板	2~10

3.2 拡散係数の簡易的な算出

前項までに取り扱った材料の拡散係数 α は、すべて実測値から逆算して求めたものである。それではそれ以外の任意の反射材を使用した器具の配光を予測計算する場合、この α をどうやって求めるかが問題とされる。そこでこの α を簡易的に算出する方法を試みた。測定には図 13 のような器具材料測定装置を用いた。

図 13 器具材料測定装置における ρ , ρ_d の測定

本装置は 30 cm ϕ の積分球 2 個を合わせたもので、光源からの光は、プリズムによって A 点に置かれた標準反射板 (MgO 板) に 45° 方向から入射し、その反射光はすべて左側の積分球によって積分され、さらに右側の積分球で反射をくり返し、上側の受光器に達する。次に A 点の MgO 板を被測定材料に換え、同様の測定を行ない、両者の比から材料の全反射率 ρ が求まる。次に A 点を平面反射鏡に換え、その正反射光の光ビームが、B 点に達するときの円形状の光ビーム断面と同じ大きさの穴があいている MgO 板をおいて、正反射光がすべて外に出ることを確かめた後、A 点を被測定材料に換えて同様の測定を行なえば、その拡散反射光だけが前記と同様な過程を経て受光され、拡散反射率 ρ_d が求まる。そこで正反射率 ρ_s は

$$\rho_s = \rho - \rho_d \quad \cdots \cdots \cdots ④$$

となる。なお穴の大きさによって ρ_s/ρ の値が多少変わるが、光源など光学系統の条件を一定にした場合の本装置におけるさきの反射材料の ρ_s/ρ と α との関係は、図 14 に示すとおりである。ただし、この場合の ρ_s とは正確な意味での正反射率ではなく、正反射方向を中心とする小さな立体角内に放射する反射光束と、入射光束の比と考えるべきである。このように、正反射率 ρ と全反射率 ρ_s の比 (ρ_s/ρ) を測定し、それと実験から求めた α との関係を示す校正曲線を作っておけば、比較的容易に α を推定することができる。

図 14 器具材料測定装置による測定 ρ_s/ρ と α の関係

図 15 東芝精密形光電色沢計 CG-2B 形による測定 $I_{60^\circ}/I_{45^\circ}$ と α の関係

なお、図 15 は東芝精密形光電色沢計 CG-2B 形による測定で、45° 入射における $I_{60^\circ}/I_{45^\circ}$ の値と α との関係を示したものである。この値からも α を知ることができる。

4. けい光灯 3 平面反射がさの配光予測計算

図 16 は、けい光ランプを用いた 3 平面反射がさ配光予測計算用のフローチャートである。この中の [REF1] ~ [REF5] は、それぞれの反射面での計算を分担するサブ

図 16 3 平面反射がさ配光予測計算用フローチャート

ルーチンの計算範囲である。ここで前述のハロゲン電球の場合と異なるのは、図 17 (a) に示すような各反射点でのランプ見込み角 $\pm \gamma$ による反射光分布の広がり、ランプ自身にさえぎられる、反射光を考慮に入れなくてはならないことである。

ランプ中心から反射面の一点 P に θ なる角度で光度 I_θ の光が当たった場合の反射光計算は、前記 (2) 式のとおりであるが、実際には P 点に $I_{(\theta-\gamma)} \sim I_{(\theta+\gamma)}$ の光が当たっている、ランプの見込み角 ($\pm \gamma$) を微小角度で等分し (ここでは 7 等分)、その各微小角内 (図の●印) からの入射光に対する反射光分布の計算を行なう。すな

図 17 (a) ランプ見込み角の分解

図 17 (b) けい光灯具比反射光度分布の計算

わち、ランプの見込み角 $\pm \gamma$ なる入射光に対する β 方向の反射光度の平均値 $I_\theta(\beta)_s$ は、

$$I_\theta(\beta)_s = \{I_\theta(\beta) + I_{(\theta+2/\gamma)}(\beta) + I_{(\theta+4/\gamma)}(\beta) + I_{(\theta+6/\gamma)}(\beta) + I_{(\theta-2/\gamma)}(\beta) + I_{(\theta-4/\gamma)}(\beta) + I_{(\theta-6/\gamma)}(\beta)\} / 7 \quad (5)$$

である。図 17 (b) はそれを示したもので、このうち右側のランプに当たる範囲の反射光 (図の斜線部分) は、全反射配光 $Y_s(\theta)$ の計算から除外する。

図 18 配光予測計算の入力条件 (3 平面の場合)

上記のほか、
 $\left\{ \begin{array}{l} RD: \text{反射率}, F: \text{反射光の計算間隔} \\ DTH: \text{ランプ出力の計算間隔}, \\ XM: \text{拡散係数}, SM: \text{配光曲線の尺度} \end{array} \right.$

プログラムは図 18 に示す条件を入力すると、前述のような配光計算を行ない、出力として各角度の比光度値と配光曲線がプリントされるようになっている。

図 19 はその計算例である。入力条件は図 18 に示す値が、 $D=165 \text{ mm}$, $TRR=70^\circ$, $TRL=70^\circ$, $AX=0 \text{ mm}$, $AY=60 \text{ mm}$, $XL=140 \text{ mm}$, $RD=0.7$, $F=2^\circ$, $DTH=2^\circ$, $XM=4.0$ (アルミ梨地反射面), $SM=5$ である。

最左端の番号 1, 3, 5 181 は鉛直角 θ を示し、91 が直下 ($\theta=0^\circ$)、1 と 181 が左右の水平方向 ($\theta=\pm 90^\circ$) である。そして、ランプに対する比光度値 (絶対値はこれにランプ光度を掛ける) と、その値に相当する長さが * 印で図示される。また図中の実線は実測値を書き入れたもので、計算値とはほぼ一致することが確かめられた。さらに一般的な白色メラミン塗装の場合 ($XM=0.6$, $RD=0.8$) を同図中に書き込むと、○印に示すような配光となる。

図 19 3 平面反射がさ(けい光ランプ使用)の計算結果の一例(実線は実測値である)

5. 結 論

(1) 照明器具の配光予測計算を行なう手段として、反射材料の反射分布特性を $Y = (1 - \sin X)^\alpha$ なる形で近似すれば、ほぼ実測に近い配光を求めることができる。

(2) 前記の式に使用されている拡散係数の α は、その材料固有のもので、実験の結果、白色メラミン焼付け板 $0.4 \sim 0.8$ 、アルミ梨地電解研磨板 $2 \sim 10$ などである。またこの値は、正反射成分と全反射率の比 ρ_s/ρ などを測定することによって、比較的容易に推定することができる。

(3) 上記の考え方に沿って、ハロゲン電球を用いた 3 平面反射がさ器具の配光予測計算方式を確立し、電算化した。またその計算結果は、実測値との照合の結果、十分信頼して使用できるものであることを確認した。

(4) けい光灯具はランプの形状や大きさによって、ハロゲン電球の場合と配光が変わる。それらの検討を 3 平面反射がさけい光灯具について行ない、実用に供することを確認した。

なお反射面が二次曲面の場合、さらに回転二次曲面に水銀灯のような光源形状の複雑なものを使用した場合の予測計算については、次回(2)で説明する。

参 考 文 献

- (1) 黒沢涼之助：投光器の測定理論 I～IV 照学誌 (昭34.2) 54～69, (昭34.11) 350～357, (昭36.5) 150～156, (昭45.12) 556～560
- (2) Bruno Weis : Lichttechnik 24-9 (1972) 455～459
- (3) H. W Bodmann and B. Weis Ltg. Res & Tech. 5-2 (1973) 112～115

(受付1976年7月9日)