照明器具反射板のCAD (2)

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 2

Tsuneo Hori (Fellow Member) Nobuo Matsushita (Member)

Sadao Takahashi (Fellow Member)

(Research Laboratory Toshiba Electric Equipment Corp)

ABSTRACT

In the previous paper, the author described the computer-aided design method to predict the luminous intensity distribution curves of simple reflectors.

In this paper, CAD method on revolved parabolic reflectors with a high intensity discharge lamp is described in the development of the theory in Part 1.

Quantities of the direct light and reflected light on the surfaces of the reflector are computed at various vertical angles, then two computed values are summed up to decide the luminous intensity.

Most efforts are directed towards formulation of a computer program to calculate the intensity from reflected light component.

The light emitting surface of the lamp is divided into many parts, light rays from each part are traced exactly in accordance with the reflection in properties of the reflector's finish.

Then, shape of the reflector is designed such that as little reflected light as possible may fall on to the lamp.

In the application of this CAD method, sufficient results are obtained practically from many experimental measurements.

Thus, new high efficiency reflectors have been developed by this method.

前回の(1)目次

1. はじめに
2. 基本的考え方
3. 試験用器具による実験
4. けい光灯 3 平面反射がきの配光予測計算
5. 結 論

前回の論文¹⁾では、材料の反射特性を一つの数式で近似して示す考え方と、それに基づいた 3 平面反射がきの配光予測計算について説明した。

3 平面反射がきから二次曲面反射がきへの応用としては、最も一般的なものとして放物線を基本にした放物面柱反射がき、回転放物面反射がきが考えられる (図 20)。

この中でも、回転放物面反射がきはダウンライト、高天井用反射がき、投光器などに広く用いられており、特に高圧放電灯 (以下 HID ランプと略記する) を使用した場合は、ほとんどが回転放物面反射がきである。

また配光予測という観点からみれば、鏡面仕上げを主にした反射がきについて、過去にいくつかの発表がなされているが^{2)~4)}、拡散性の反射面については、完全拡散面に近いものだけである³⁾。さらにその前提条件とし

* 東芝電材研究所
この一部は昭和52年4月照明学会全国大会で発表済み。

図 20 3平面反射がさが二次曲面反射がさへの応用

て、光源の大きさや形状が重要な問題となるが、それらはすべて点光源や小さな球状光源、または円筒状光源として取り扱っているため、実際とかけはなれてしまう場合がある。

ここでは、拡散反射面（白色メラミン焼付け面やほうろう面）から梨地電解研摩面まで、幅広い反射特性を有する高天井用反射がさを中心にした回転放物面反射がさに、けい光水銀ランプを使用した場合の配光予測計算方法とその計算例につき説明する。

6. 放物面反射がさへの応用

6.1 反射点Pの反射光

図 21 に示すような焦点 $F(f, 0)$ の放物面反射がさにおいて、光源 C から放物線軸と θ なる角度で放射された光が反射面に当たる点 P の座標 (x, y) を求めるには、入射光が放物線軸の垂線とのおなす角を φ として、

$$\varphi = \theta - 90^\circ$$

$$\tan \varphi = (x_0 - x) / (y - y_0)$$

放物線の公式

$$x = y^2 / 4f \quad \dots\dots\dots (6)$$

から

図 21 放物面反射がさの反射光

$$y = 2f(-\tan \varphi \pm \sqrt{\tan^2 \varphi + (x_0 + y_0 \cdot \tan \varphi) / f}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

になる。

また、反射点 P から正反射方向の光が放物線軸とのおなす角を δ とすれば、

$$\delta = \varphi + g = \tan^{-1} \left(\frac{x_0 - x}{y - y_0} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{x - f}{y} \right) \quad \dots\dots (8)$$

反射面への入射角 θ は

$$\theta = \frac{90 + g}{2} - \delta \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。 f , x_0 , y_0 は定数であるから、反射点 P の座標 (x, y) は(6), (7)式から θ の関数となる。また δ , θ も(8), (9)式から θ の関数として求められるため、前回の論文(1)の2章で説明の3平面反射がさの場合と同様に、 θ によって反射点を示し、計算間隔 $\Delta\theta$ ごとの各入射光強度 I_θ を基準に配光計算を行なうことができる。

図 22 比反射光度の算出

図 22 は、材料面の法線からの角度 β に対する前記各角度の関係を示したもので、 $I_\theta(\beta)$ は図 6 の場合と同様に、(2)式ならびにそれ以下に示してある β と θ の関係式によって計算される。

6.2 反射面の配光計算

反射面が平面の場合には、各反射点における β 座標は一定であるから、 β_1 方向の合計比反射光度 $I_s(\beta_1)$ の算出は図 7 および(3)式で説明のようにして、各入射光 $(I_\theta, I_{\theta+\Delta\theta}, \dots)$ による β_1 方向の反射光を合計すればよいが、反射面が曲線の場合は、鉛直角 θ に対する β の基準点（反射面の法線方向）が各反射点によって異なる。そこで、 $\theta = \theta_1$ 方向の全反射光度 $I_s(\theta_1)$ は(3)式を変形して

$$I_s(\theta_1) = I_\theta(\beta_1) + I_{\theta+\Delta\theta}(\beta_2) + I_{\theta+2\Delta\theta}(\beta_3) \dots\dots (10)$$

で求めなければならない。図 23 はそれらの関係を図示したものである。

6.3 回転放物面の配光

前記図 23 ならびに(10)式によって求めた配光は、直管形けい光灯具のような、長形器具 A-A 面の配光予測計算である。回転放物面の配光を算出する場合は、この

図 23 配光計算の手法

反射光を反射がさ中心軸に対して一回転積分するが、このとき水平方向に広がった反射光の一部が、かさによってカットされることを考慮に入れなければならない。またそのカットの程度は鉛直角 θ によって異なるので、その計算は複雑となる。

図 24 出力計算の範囲

すなわち、図 24 の $I(\theta_0)$ は計算値の全部が出力となるが、 $I(\theta_n)$ 方向に近づくに従って、そのカットされる角度範囲がしだいに多くなり、 $I(\theta_n)$ 以上は全部がカットされる。その逆側 $I(\theta_n')$ 方向も同様である。反射点 P とかさ開口部の中心点 Q を結ぶ線が垂線とのなす角を θ_0 として、反射光の計算間隔を $\Delta\theta$ とすれば、図 25 から計算上の反射垂直角 θ_m は

$$\theta_m = \theta_0 + n \cdot \Delta\theta$$

ただし、反射光が PQ の左側にあれば

$$n \cdots 1, 2, 3, 4 \cdots \cdots n \cdot \Delta\theta \leq \angle R_1 P Q$$

反射光が PQ より右側にあれば

$$n \cdots -1, -2, -3, -4 \cdots \cdots n \cdot \Delta\theta \geq -\angle R_2 P Q$$

かさ開口面と反射光との交点 M と Q との距離 r は、反射点 P より開口面に直角におろした点までの距離を h として、

$$r = h(\tan \theta_m - \tan \theta_0)$$

有効開口部の半径 K は、

図 25 水平方向反射光カット比の算出

$$K = \sqrt{D^2 + r^2} \quad D \cdots \cdots \text{かさ開口部半径}$$

そこで、回転放物面の θ_1 方向の反射出力光の合計 $I_{rs}(\theta_1)$ は、これらの反射光のカットを考慮に入れたものの一回転積分であるから、下記のように表わすことができる。

$$I_{rs}(\theta_1) \propto \sum_{\theta=\theta_0}^{\theta=\theta_1} I(\theta_1) K/D \cdots \cdots (11)$$

7. HID ランプ使用による近似計算方法

さきの 3 平面反射がさの配光予測計算は、棒状ハログゲンランプ、または直管形けい光ランプを用いた場合の A-A 面配光についてであるから、光源の大きさや形状による問題の解決は比較的簡単にできた。さらに放物面柱反射がさに直管形けい光ランプ、または外管透明形の HID ランプを水平点灯した場合の光源の大きさ対策も、前記 (4 章) と同じ方法で計算することができるが、回転放物面反射がさに外管拡散形の HID ランプを用いた場合には、新たにその大きな対策を考慮しなければならない。その点を列挙すると、

(a) 光源が比較的大きく、そして複雑な形状をしていること。

(b) そのために、かさの反射光がランプにけられて出力とならない部分の計算が複雑になる。

(c) かさの計算上の反射点への入射光分布が、各点によって異なる。

(d) ランプの直射光分布と、その直射光がかさによって一部けられる範囲の計算

などである。それらについての計算方法を下記に説明する。

7.1 ランプ直射光の計算

図 26 は、回転放物面反射がさにけい光水銀ランプを用いた場合のランプ直射光を分析したものである。①の

図 26 ランプ直射光の分析

範囲は全部がそのまま出力に、①の範囲はその一部が出力になる。この直射光を電算機入力とするため、実測の配光曲線に近似する式を求めた。その一例として当社 400 W けい光水銀ランプの場合をあげると、下記のようになる。

直下光度 ($\theta=0^\circ$ の光度) を 1 とした場合

θ が 0° から 40° の範囲では

$$\theta' = \frac{90}{40}(40 - \theta) \text{ として}$$

比ランプ光度

$$I_l \approx 1.515 - 0.515 \times \sin \theta' \quad \dots\dots\dots (12)$$

θ が 40° から 90° の範囲では

$$\theta' = \frac{90}{50}(\theta - 40) \text{ として}$$

比ランプ光度

$$I_l \approx 1.515 + 0.485 \times (\sin \theta')^{0.8} \quad \dots\dots\dots (13)$$

図 26 の③の範囲は、この式で計算されたものがそのまま直射光出力である。

次に④の範囲の計算に移る。ランプ表面はすべて輝度が等しいと仮定すれば、この I_l に計算角度からランプを見込む発光面の面積比を掛けたものになる。そこで計算角度 θ から見込むランプの比長さとし、その発光面の見掛けの面積比との関係を求めた。ランプ最下部から中心までの長さを L_v とし、 θ 方向から見込むランプ中心線の長さを L_a とすれば、 $L_a/2L_v$ とランプ見掛けの面積比 SM ($\theta=90^\circ$ の場合の SM を 1 とする) との関係は、当社の 400 W けい光水銀ランプの場合を例にとると、

$$SM = \left(\sin \left(90 \times \frac{L_a}{2L_v} \right) \right)^{2.1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

で近似される。したがって図 26 ④の部分のランプ直射光 $I_l(\theta)$ は、

$$I_l(\theta) = I_l \cdot SM$$

で求めた。

図 27 けい光水銀ランプを使用した場合の計算手法

7.2 反射点 P の入射光と反射光計算

図 27 は、回転放物面反射がさにてけい光水銀ランプを使用した場合の計算手法を説明したものである。ランプ中心からの鉛直角 θ によって求められた反射点 P より見た光源の見込み角 γ を n 等分し、その各々の中心に光源があるものと仮定して、各光源からの入射光に対する反射光分布の計算を行なう。この手法は前記 4 章、図 17 (a), (b) で説明のけい光ランプの場合と同じであるが、各点における計算上の仮定光源からの比入射光度 $I_{\theta 1} \sim I_{\theta n}$ が異なる。

図 28 各計算上の光源からの比入射光度

図 28 はその計算の一例で、400 W けい光水銀ランプを各 θ 方向から見た見掛けの面積の変化状態を示したものである (実測)。ランプ表面を等輝度と仮定すれば、 θ に対する各反射点の比入射光量 Q_θ は、この値に比例することになる。そこで計算上の仮定光源からの比入射光度 $I_{\theta 1} \sim I_{\theta n}$ は、図 29 (a) に示すように、その鉛直角位置のランプ中心軸からの横幅 $R_1 \sim R_n$ に比例するものとし、

$$Q_\theta = R_1 + R_2 + R_3 \dots\dots\dots + R_n$$

$$I_{\theta 1} = R_1 / Q_\theta \quad I_{\theta 2} = R_2 / Q_\theta \quad I_{\theta 3} = R_n / Q_\theta$$

である。この $R_1 \sim R_n$ も前記と同様、実測値に近似する

図 29 (a) 各計算上の光源からの入射光光度の計算

図 29 (b)) 400 W けい光水銀ランプ発光部の寸法

式を使った。400 W けい光水銀ランプの場合は図 29 (b) から

$$R = 34 \cdot \cos(90/78L) + 24 \dots \dots \dots (15)$$

ただし、 L はランプ中心からの鉛直距離である。

そこで、 P 点から β_1 方向の全反射光 $I_s(\beta_1)$ は

$$I_s(\beta_1) = I_{\theta_1}(\beta_1) + I_{\theta_2}(\beta_1) \dots \dots \dots I_{\theta_n}(\beta_1) \dots \dots \dots (16)$$

ただし、図 30 より

図 30 各入射光角度の算出

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{L_v + L}{D} + \tan^{-1} \frac{L_v - L}{D}$$

$$\theta_1 = 90 - \tan^{-1} \frac{L_v - L}{D} + \frac{\gamma}{2n}, \quad \theta_2 = \theta_1 + \frac{\gamma}{n},$$

$$\theta_3 = \theta_1 + 2 \frac{\gamma}{n} \dots \dots \dots \theta_n = \theta_1 + (n-1) \frac{\gamma}{n}$$

D は中心軸より反射点 P までの水平距離である。

7.3 ランプにカットされる反射光

P 点から垂直角 $\theta \pm 4\beta$ ごとに放射される計算上の反射光が、ランプによってカットされる範囲は、400 W けい光水銀ランプを例にとると、図 31 から

図 31 反射光がランプによってカットされる範囲 (400 W けい光水銀ランプを使用の場合)

$$U_v = \cos^{-1} \left(\frac{l^2 + c^2 - 81.6^2}{2lc} \right) \dots \dots \dots (17)$$

ただし、ランプの下側は

$$l = \sqrt{c^2 + 81.6^2 - 163.2 \cdot c \cdot \cos(\theta - 17^\circ)}$$

ランプの上側は

$$l = \sqrt{c^2 + 81.6^2 - 163.2 \cdot c \cdot \cos(163^\circ - \theta)}$$

また、

$$U_{v1} = \cos^{-1} \left(\frac{c^2 + c_1^2 - L^2}{2cc_1} \right) \dots \dots \dots (18)$$

垂直角 U_v 内の反射光がカットされる水平角の範囲は、ランプの中心線から左右に R 以下の場合である。よって同図から

$$L = c \cdot \cos \varphi \{ \tan \varphi - \tan(\varphi \pm n \cdot 4\beta) \}$$

(15) 式にこの L を入れて R を求め、カットされる水平角を U_h とすれば

$$U_h = \tan^{-1}(R/C') \dots \dots \dots (19)$$

ただし、

$$c' = c \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\varphi \pm n \cdot 4\beta)}, \quad n \cdot 4\beta \leq U_v$$

である。

また、反射光の垂直角が U_{v1} 内のものは実測値との比較の結果、その計算上の全反射光 $I_s(\theta)$ に係数を乗じたものを出力とすることによって、ほぼ実際に近い値が得られた。ただしこの係数は、ランプの種類、かさとの相

対関係位置などによって異なるものである。なお、この出力計算は、反対側のかさ下辺との角度 U_2 までの反射光について行なうもので、それ以上の角度のものは計算から除外する。

8. 回転放物面反射がさの配光予測計算

図 32 は回転放物面反射がさ配光予測計算のフローチャートである。

図 32 配光予測計算フローチャート

図 33(a)~(c) に計算の一例を示す。(a) は 400 W のけい光水銀ランプを使用した広照形の高天井用反射がさ(表面梨地電解研摩)のものである。入力のかさの各寸法のほか、光束の計算間隔、反射率、拡散係数、ランプの種類などを入れる。そうすると光源中心からかさに対する光束 I_0 による反射光の計算範囲 (θ の最少と最大、図の THMIN, THMAX) や、ランプの直射光が欠けはじめる角度と、全部かくれる角度 (図 26 の ㉔ と、㉔ + ㉕, 図の TH4, TH5) などがプリントされる。そして左端からかさに対する鉛直角、1,000lm 当たりの光度とそれに相当する長さのところに * 印がプリントされる。これは 5° ごとにプリントしたものであり、わかりやすいように破線で結んだ。そこに図の ○ 印と実線は実測値を書き入れたものである。そして器具効率と最大取付け間隔 (図の EFFICIENCY と S/HM) がプリントされる。これも実測値をその下に書き入れたが、配光形状

ならびに器具効率などはほぼ合致していることがわかる。

同様にして、同図(b)は同じかさに 250 W けい光水銀ランプを使用した場合、(c)は 400 W けい光水銀ランプを使用した狭照形の高天井用反射がさ(表面梨地電解研摩)の配光計算と実測値の比較例である。

高天井用反射がさ A (広照形) + HF400X

*STOP=1, REFLECTOR CONDITION=2, CALCULATION CONDITION=3
= 2

図 33 (a) 回転放物面反射がさ配光予測計算例(1)

高天井用反射がさ A (広照形) + HF250X

*STOP=1, REFLECTOR CONDITION=2, CALCULATION CONDITION=3
= 1

図 33 (b) 回転放物面反射がさ配光予測計算例(2)

高天井用反射がさ B (狭照形) + HF400X

図 33 (c) 回転放物面反射がさ配光予測計算例(3)

計算値と実測値の比較例はこのほか数多くある。またいろいろな場合を想定した計算、たとえば高天井用反射がさについて、(a) かさの開口径、(b) かさの深さ、(c) 放物線軸の傾斜角、(d) ランプの位置、(e) 反射面の拡散程度などを変化させたことによる得失、さらに所要の配光形状を満足させた上に最も高効率となるような、前記(a)～(e)までの組み合わせの検討などを行なった結果、図 34(a)～(c)に示す 250～400 W 用のものは、当社同等の従来品に比べて約 14 % の器具効率の向上が得られた。

それらの設計や計算過程については、光学設計上の問題点を含めた内容の説明とともに今後の報告としたい。

9. 本論文の(2) まとめ

この論文(2)では、前回の論文(1)で確かめられた反射光分布を一つの数式で近似して取り扱う考え方と、その計算方法を回転放物面反射がさに HID ランプを使用した場合に応用した例をあげた。そしてこの計算手段は、実験による近似式を使ったり、理論的に考えればまだ足りない点もみられるが、配光予測を行なうための実用には問題ないことを示したものである。論文の(1)と(2)で説明した計算例は照明器具の代表的な形状のもので、実際にはこれらを複合した反射板などもあるが、いずれもこの方法をもとに計算することができる。今後は新高天井用反射がさ開発のために用いた計算データをもとに、光学設計上の考慮しなければならない点などをまとめる予定である。

参 考 文 献

- (1) 堀 恒夫ほか：照明誌 61-5 (昭 52) 259～266
- (2) 黒沢涼之助：投光器の測光理論 I～IV 照学誌 (昭 34. 2) 54～60, (昭 34. 11) 350～357, (昭 36. 5) 150～156, (昭 45. 12) 556～560
- (3) Bruno Weis : Lichttechnik 24-9 (1972) 455～459
- (4) H. W. Bodmann and B. Weis : Ltg. Res. & Tech 5-2 (1973) 112～115
- (5) Bill F. Jones : Illum. Engng 55-7 (1960) 386～394

(受付 1977 年 6 月 9 日, 再受付同年 10 月 6 日)

図 34 250～400 W 高天井用反射がさ
(a) 狭照形 (b) 広照形 (c) 特広照形