照明器具の光学設計におけるコンピュータ利用[†]

正会員 佐藤 光治* 専門会員 松下 信夫*

1. ま え が き

一般に照明器具の設計は三つの部分に大別される。光源から放射された光を、所要の方向に配分する光学機能部分（光学設計）、光源に給電する電気機能部分（電気設計）、そして光源の保持、取付け機構、装飾性などを含めた機械的機能部分（機構設計）である。

照明器具の働きは、主にその場所に適した照明環境を作りだすことにありとすれば、三つの設計の中で光学設計は照明器具の働きを左右する重要な要素である。特に照明用電力の有効利用が重要な昨今ではなおさらである。

光学設計においては、古くから幾何光学をもとにした光線追跡法が用いられてきた。また、いくつかの配光予測方法や所要配光を得るための形状設計法が利用されてきた。最近では電子計算機の普及により、これらの設計計算を機械化して、設計の最適化がはかれるようになった。その結果、器具効率の大幅な向上や、多様な配光特性を持った照明器具の開発が活発に進められている。

本報では、初めに照明器具の光学設計における従来の方法を概括し、次に最近の CAD(Computer Aided Design) 技術と、そこから生まれた新しい照明器具の例を述べる。

2. 従来の光学設計方法

光学設計の基本は、光源から放射された光線が光学系を経由してどの方向に出射するかを、作図により求めることであろう。この方法は一般的に光線追跡と呼ばれている。

この場合、追跡が比較的容易な形状が設計の主たる対象となり、反射板であれば主に放物面や楕円面が用いられ、レンズの場合は球面が多く用いられてきた。光学系の基本的な性質を定性的に把握する上で、この光線追跡は有用であるが、実際の配光を定量的に予測することはむずかしい。そこで、ある制限条件のもとで量的な設計評価が可能ないようにいくつかの方式が開発され、応用されてきた。

たとえば、与えられた所要配光から、反射板の形状を求める光束対応図の方法がある。¹⁾²⁾ これは図 1 に示すよう

に、光源の配光を細分化して器具の所要配光に分配していくものであるが、この方法には、点光源であること、完全鏡面の反射板であることが条件とされている。

図 1 光束対応法の原理

(a) 光源の配光の分割 (b) 光束の分配法

また、放物面鏡と球光源を組み合わせた光学系の配光予測の方法がある³⁾。この方法は、放物面鏡の各点における反射光の広がり、図 2 に示すような作図あるいは計算で求め、配光の各鉛直角ごとに光っている放物面鏡の面積を加えていくという考え方から成り立っている。主に投光器などの指向性の要求される反射鏡の設計などに応用されている。

図 2 放物面鏡と球光源からなる場合の配光予測方法

そのほかにも、拡散性の球形グローブの器具効率を求める方法⁴⁾、蛍光灯埋込み下面開放器具（拡散性反射板）の効率の検討⁵⁾ などがある。

これらの考え方や方法は、電算機を利用した場合でも光学設計の基本となるものである。しかし、より正確な配光性能が求められる場合、光源の大きさや形状と、反射板で

[†] Computerization of Optical Designing for Lighting Fixture

* 東芝電材研究所 Kouji Sato Nobuo Matsushita

本資料の一部は昭和57年度照明学会全国大会に発表したものである。

あればその反射特性を十分に考慮に入れる必要がある。

3. 電算機を利用した光学設計

光学系の中には、図 3 に示すように配光に影響を及ぼす要素が数多くある。CAD による光学設計方法でもある程度の制約条件は有しているが、従来の方法と比較すれば汎用性は非常に高い。その特徴をまとめると次のようになる。

図 3 配光特性に影響を与える要素

- (1) きわめて短時間で、幾何学的計算が行なわれる（設計の高速化）。
- (2) 計算間隔を細かくできるので、予測精度が向上する（設計の高精度化）。
- (3) 作図や手計算では評価のむずかしい要素、たとえば光源の形状や輝度分布、反射板の反射特性なども評価できる（設計の高度化）。
- (4) 設計に必要な理論はプログラム化されているので、必要な条件を入力するだけで、光学設計を行なうことができる（設計の容易化）。

3.1 設計方法の分類

CAD による光学設計には、二通りのアプローチが考えられる。一つは、与えられた光学系から配光を求める方法（配光予測）であり、他は所要配光から光学系の形状を求める方法（形状予測）である。また光学系の構成の面から大きく反射系と透過系の二つに分けられる。今までに報告された CAD による設計方法を、上記の観点から分類した結果を表 1 に示す。

一般に、設計の手順の面からすると光学系の形状予測を

行なう方法が望ましい。しかし、現状では多くの仮定と制約条件を折り込む必要がある。たとえば HID ランプのように、大きな光源でも点光源として扱わなければならない。また、鏡面反射系や散乱のない屈折系などに応用が限定されている。これに対して、光学系の配光予測を行なう方法は、個々の光学系要素が配光特性に及ぼす影響を予測するのに適しており、また報告も配光予測に関するものが多いようである。

3.2 所定の形状から配光を予測する方法

配光を評価するうえで、主な項目として器具効率、中心光度、1/2 ビーム角（場合によっては 1/10 ビーム角）、最大光度およびその角度、光源の遮光角、および最大取付け間隔などがある。したがって、使用する光源と光学系の諸要素のいろいろな組み合わせのもとで、これらの評価項目を予測することが具体的な作業となる。以下、これまでに報告された配光予測の種々の方法と、それによる新しい照明器具の例を述べる。

3.2.1 反射特性を考慮した配光予測方法

一般に使用される反射板の表面は完全鏡面ではなく、程度の差はあっても、正反射成分と拡散反射成分を合わせ持っている。この両成分を計算するため図 4 に示すように反射特性を入射角度の関数で表わす方法を採用し、光源は微小に分割された点光源として扱う方法^{7)~9)}がある。この結果、白色塗装のような拡散面や、種々の梨地状反射面の予測が広く可能となった。

図 4 反射特性を考慮した配光予測の原理

図 5 は、この方法を用いて開発された高天井用反射がさの一例である⁹⁾。器具効率は 82%、鉛直角 60° 以上の輝度は従来品の 1/2~1/20 に低減され、グレア軽減がなされている。また図 6 は高純度のアルミニウムと石英ガラスを蒸着した反射鏡を採用した HID ランプ用投光器の一例

表 1 電算機を利用した光学設計法の分類

設計方法		光学系	反 射 系	透 過 系
配光予測	与えられた光学系の形状から、配光を予測する方法	光源を細分化して点光源として取り扱う方法	1. 反射特性を考慮した方法 ^{6)~11)} 2. 光源の輝度分布を考慮した方法 ^{12)~14)} 3. 多面体反射鏡の検討 ^{14)~15)}	1. プリズム形状を関数近似した方法 ¹¹⁾ 2. 角度の異なるプリズムへの応用 ¹⁵⁾
		光源の大きさから、ビームの開きを求める方法	1. 球光源に放物面鏡を組み合わせた場合の検討 ^{16)~18)}	1. フレネルレンズへの応用 ¹⁵⁾
		光っている面積を求める方法		1. 逆光線追跡法により光っている面積を求める方法 ¹⁹⁾
形状予測	目標配光から光学系の形状を求める方法		1. ランプ配光を細分化し、目標配光の各角度に光束を分配していく方法 ^{15)~20)} （光束対応法） 2. 微分方程式を用いる方法 ^{21)~25)} 3. 反射板の大きさを指定できる方法 ²⁶⁾

図 5 CAD 技術を応用した照明器具(1)
(250~400 W 用高天井反射がさ)

図 6 CAD 技術を応用した照明器具(2)
(660 W~1 kW 用 HID ランプ用投光器)

である¹⁰⁾。鏡面性を有効に利用した形状によって、従来と比較して器具効率は 5 %、光束効率は 8 %向上している。

図 7 は白熱電球用ダウンライトの一例である²⁷⁾。CAD により適切な光源位置と反射板形状が検討された結果、器具効率が約 30 %向上した。

図 7 CAD 技術を応用した照明器具(3)
(60 W 白熱電球用ダウンライト)

図 8 CAD 技術を応用した照明器具(4)
(HID ランプ用混光照明器具)

また図 8 は、綿密に計算された多平面反射板により、メタルハライドランプと、高圧ナトリウムランプを同一の反射がさに収納しても、光色むらのきわめて少ない混光照明器具の一例である²⁸⁾。

3.2.2 光源の輝度分布を考慮した方法

より正確な配光予測を行なうには、光源の輝度分布をさらに正確に取り扱う必要がある。自動車の前照灯の光学設計において、光源の輝度分布を従来にない考え方で厳密に処理した例がある¹⁴⁾。図 9 に白熱電球の二重コイルの輝度分布モデルを示す。主な特徴は、二重コイルの内面の輝度と外面の輝度を別々に取り扱っていることである。これにより、従来レンズ系で光を制御していたものが、反射鏡だけで制御できる前照灯を開発している。その他、HID ランプの輝度分布の問題について検討した報告があ

図 9 二重コイルフィラメントの輝度分布モデル

る¹²⁾¹³⁾。

3.2.3 多面体反射板の配光予測の方法

反射板と光源をそれぞれ細分化し、反射板は小平面の集合、光源も点光源の集合と考えた方法がある¹⁵⁾。図 10 に示すように各点光源ごとに各小平面の光線追跡を行ない、最後にその総和により配光予測を行なっている。この方法により得られた反射板の形状は多面体となり、水中投光器などに応用されている。

図 10 多面体反射板の配光予測の原理

3.2.4 プリズムの配光予測の方法

プリズムの形状をフーリエ級数近似あるいは、区間近似で表わす方法がある¹¹⁾。またこの方法ではプリズムの特徴である境界面の反射などによる枝分かれ現象も、計算できるような考慮がなされている。

3.2.5 逆光線追跡法による配光予測方法

今まで述べてきた光学設計の基本は、あくまで光源→反射板(またはレンズ)→被照面(配光)という順序で光線追跡を行なっている。これに対して、被照面(配光)→反射板(またはレンズ)→光源という従来の逆の順序で配光予測を行なう方法がある¹⁹⁾。この方法は逆光線追跡法と名付けられ、光学系に複数の平行光線を入射させることにより、光っている面積(Flushed Area)を求めている。図 11 はこの考え方を模型的に表わしたものである。この方法の特徴として以下があげられる。

図 11 逆光線追跡法の原理

- (1) 光度と光っている面積を対応させることにより、光学系の修正、改良へのフィードバックが容易である。
- (2) 器具の化粧枠や、バッフルなどの出射側の遮光物の影響を評価しやすい。
- (3) 光源の分割(点光源化)が不要であるので、計算量が少なくてよい。

(4) 三次元的な配光予測への拡張が容易である。

図 12 は、この方法により開発された電光式道路情報板用の省電力形表示電球の一例である。最適設計された非球面のレンズがバルブ頂部に設けられているので、光が有効な範囲に集光される。

図 12 CAD 技術を応用した
レンズ付き電球
(道路情報板用省電力形表示電球)

この結果、ランプ電力は従来の 4 W から 1.5 W に低減されている。

またこの方法は、図 13 に示すような鏡面性蛍光灯器具の反射板設計に応用され、グレアレス形の配光を効率良く具現化している。

図 13 CAD 技術を応用した
照明器具(5)
(40 W 2 灯用蛍光灯器具)

3.3 所要配光から光学系を求める方法

照度分布を均一にするような配光、また特定の照射パターンが得られるような配光を目標として、これを具現化するための反射板の形状を求める方法である。

2. で述べた光束対応図の方法を電算化して、回転対称な鏡面性反射板の形状を求めるプログラムが開発されている¹⁸⁾²⁰⁾。光源は多数のエレメントに分割されて処理されている。

また、照明器具の配光曲線と光源の配光曲線をそれぞれ簡単な数式で与えたとき、両者を対応させるための反射鏡の形状は、一つの微分方程式で表わされ、反射鏡の個々の位置の傾きが求められる、という研究もある^{21)~25)}。

光学系の形状予測において、所要配光を効果的に実現することは重要であるが、光学系をある所定空間内に収納することも重視すべき項目である、この点を考慮した反射板の形状予測の方法が報告されている²⁶⁾。この方法では、図 14 (a) に示すように、指定された反射板可能範囲(斜線

図 14 反射板の形状予測方法の一例

(a) 反射板可能範囲の一例

(b) 同一配光を得るための反射板の設計例

で示された部分)の中を、反射板設定の始点 I から終点 F に向かって、所要配光を実現するように逐次設計される。また同一の所要配光に対して、反射板可能範囲を変えて設計した場合の例を図 14 (b) に示す。このように、この報告によれば、所要配光を実現する任意寸法の反射板が容易に設計できる。

4. おわりに

電算機の普及により、照度や照明率の精密な予測が可能になっただけでなく、照明器具の光学設計技術も大きく進展した。その結果、効率の大幅な向上やいろいろな照明条件に対して最適な配光性を持った照明器具が、数多く生みだされている。

今後は、特に周辺装置の発達と相まって、CAD による光学設計は、次のような展開がなされていくものと思われる。

- (1) 非対称配光を含めて、配光の空間(三次元)的予測。
- (2) 所要配光から形状を定めていく方式において、光源の大きさや輝度分布などの条件を考慮した予測。
- (3) 入出力の一層の簡易化と対話形設計の発展。
- (4) 光学系の開発を一層効率よく行なうため、設計—製作—試作、さらには測定・評価までの過程のシステム化など。

よりよい照明環境を効率よく作りだすために、電算機による照明器具の光学設計は、重要度をさらに増していくと思われる。今後の発展が期待される。

参考文献

- (1) 黒沢：照学誌 36-6 (昭27) 190~193
- (2) Lynes, J. A.: Light and Lighting 48-7 (1955) 239~242
- (3) 黒沢：照学誌 45-12 (昭36) 556~560
- (4) 黒沢・東芝レビュー 11-2 (昭31) 195~208
- (5) 佐藤ほか：昭54照学会全国大会予稿集 p. 37
- (6) Jones, B. F.: Illum. Engng. 55-7 (1960) 386~394
- (7) 堀ほか：照学誌 61-5 (昭52) 259~266 61-12 (昭52) 721~727
- (8) Takahashi, S. et al: Publication CIE No. 50 (1980) 337~341
- (9) 松下ほか：照学誌 63-4 (昭54) 194~198
- (10) 松下ほか：照学誌 64-10 (昭55) 585~590
- (11) 清水ほか：松下電工技報 No. 22 (昭56) 17~31
- (12) 阪口ほか：電学研究會資料 LS-78-18 (1978) 18-1~18-7
- (13) 明道ほか：昭56照学全国大会 pp. 52
- (14) Donohue, R. J. et al: J. Illum. Engng. Soc. 2-1 (1972) 36~42
- (15) Baker, G. A. et al: J. Illum. Engng. Soc. 6-4 (1977) 246~254
- (16) Holmes, J. G. et al: Light. Res. Technol. 11-4 (1979) 193~197
- (17) Holmes, J. G. et al: Light. Res. Technol. 9-4 (1977) 189~193

- (18) Lewin, L.: Light. Des. Appl. 7-8 (1977) 26~31
 (19) 佐藤ほか: 昭57照学全国大会 pp. 57
 (20) Bodmann, H. W. et al: Light. Res. Technol. 5-2 (1973) 112~115
 (21) Schrubben, J. S.: J. Opt. Soc. Am. 64-1 (1974) 55~58
 (22) Spencer, D. E.: J. Opt. Soc. Am. 55-1 (1965) 5~11
 (23) Malliaris, C.: Appl. Optics 9-3 (1970) 553~560

- (24) Herman, S.: Appl. Optics 9-7 (1970) 1702~1706
 (25) Schrubben, J. S.: J. Opt. Soc. Am. 62-12 (1972) 1498~1501
 (26) 明道ほか: 電学研究会資料 LAV-81-6~10 (昭56) 15~21
 (27) 東芝レビュー 35-4 (昭55) 378
 (28) 小林ほか: 昭55照学東京支部大会 pp. 12

(受付1982年6月8日)

新製品紹介

小型軽量で照射方向の熱線をカットした 撮影用照明器具

《アイ・ビデオライト》

岩崎電気株式会社では、ビデオカメラに装着する小型軽量の照明器具を9月1日より発売した。

現在、ビデオ機器の小型軽量化が懸命にすすめられているが、それに装着する照明器具は、ほぼカメラの大きさに等しいもので、照明側の改良が懸案となっていた。

新製品は、ダイクロイックミラーと呼ばれる多重層薄膜反射鏡と、ハロゲン電球を組み合わせた小型光源を使用することによって、従来にないコンパクトな照明器具としたものである。照明器具の仕様・特性およびランプ特性は、表に示すとおりで、ランプを含めた特長を以下に示す。

＜特長＞

(1) 200時間の長寿命である。

一般の撮影用光源は、色温度が3200 Kで設計されているため、寿命は50~100時間である。本照明器具に用いるハロゲン電球は、色温度3100 Kをダイクロイックミラーにより3200 Kに変換するため200時間の長寿命が得られる。

(2) 熱線（赤外線）が非常に少ない。

従来高照度で人物などを撮影した場合、熱感が生じ不快感を

＜ランプ特性＞

形 式	寸 法		電 圧	大 き さ	色 温 度	平均寿命	軸 光 度	1/2 ビーム特性		前方光束
	径	全 長						ビーム角	ビーム光束	
JVR 100 V 150 W 2 H	φ 50.5	45	100 V	150 W	3200 K	200 時間	4,200 cd	43°	1,440 lm	2,560 lm

(a) アイ・ビデオライト JVL 1500
 (b) ダイクロイックミラー付きハロゲン電球
 JVR 100 V 150 W 2 H

起こさせることがあったが、同ハロゲン電球は、ダイクロイックミラーで照明方向への赤外線90%近くをカットするので、高照度でも熱感がほとんど生じない。

(3) 小型軽量である。

ビデオライトの仕様に示すように小型軽量であるので、カメラに装着しても片手で自由に撮影できる。

＜仕様＞

形 式	JVL 1500
適 合 光 源	ダイクロイックミラー付きハロゲン電球 JVR 100 V 150 W 2 H
使 用 電 源	AC 100 V, 50/60 Hz
電 源 コ ー ド	耐熱コード、有効長3m
寸 法 (横幅×高さ×奥行)	80×170×125 (mm) (ガード含む)
重 量	約 600 g
標 準 価 格 (ランプ付き)	12,000 円

＜器具特性＞

形 式	寸 法	電 圧	大 き さ	色 温 度	平均寿命	軸 光 度	1/2 ビーム特性		前方光束
							ビーム角	ビーム光束	
JVL 1500	φ 50.5	45	100 V	150 W	3200 K	200 時間	43°	1,440 lm	2,560 lm

問い合わせ先 〒361 埼玉県行田市荻里山町 1-1
 岩崎電気株式会社埼玉製作所技術課
 電話 0485 (54) 1111