光は真っすぐ進むけれど 反射鏡設計における光学シミュレーション

Optical Simulation Method with a Reflective Mirror Design

1949年生。1972年立命館大学理工学部電気工学科卒。同年、岩崎電気㈱に入社。照明設備設計を担当。1980年より照明理論などの研究に従事。現在、技術部次長、技術開発グループ長、日本色彩学会会員、日本人間工学会会員、日本生理人類学会会員。

専門会員 川上 幸二
Kohji Kawakami

1. はじめに

光源から照射される光は、真っすぐに進んでいってしまう。照明したい面に光を効率よく入射させるには、光源から出た光を曲げ、不必要な空間へ逃げ去ってしまう光を有効に使う手だてが必要になる。

反射鏡の設計は、必要とされる量の光を必要とされる方向に配分できる反射面形状を決定することである。現時点では、コンピュータ利用は、自動的に反射曲面を描くものよりもむしろ、与えた反射鏡形状からどのような配光になるかを光学シミュレーションするものが多い。シミュレーション方法は、モンテカルロ法とレイトレーシング法を用いたソフトが主流である。

ここでは、その概要と計算処理上の課題について述べることにするが、本論に入る前に、反射鏡設計のための基本的なことについて少しふれてみることにする。

2. 反射鏡の基本曲面

反射鏡を構成する基本曲面は、放物線や楕円の回転面が良く用いられる。

放物線（図1）は、(1)式で表され、その焦点から出た光は、平行光として反射される。したがって、投光器やスポットライトなど光を集光させたい場合や、OAルーバのように所定の遮光角内でルーバ面が輝かないような反射面を得たい場合などに用いられる。

$$y = d \cdot x^2 + \frac{1}{4d} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、焦点座標 (0, 0)

楕円（図2）は、(2)式で表され、一次焦点から出た光

は、二次焦点を通るように反射される。したがって、光源から比較的近距离で集光させたい場合、たとえば、ピンホールダウンライトや光ファイバなどへ光を採り込みたい場合などに用いられる。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $b > a$ の時、焦点 $\pm \sqrt{b^2 - a^2}$

実際の反射鏡設計では、放物線や楕円の回転面そのものが用いられるほか、種々異なる放物線や楕円の切片が組み合わせて用いられる。

放物線や楕円では、同じ焦点を持つ曲線が、焦点に近いところを通るものから遠いところを通るものまで、無限通りの曲線を描くことができる。もし、光源が点であれば、どの曲線を用いても同じ配光が得られることになる。しかし、実際に使用される光源は、有限の大きさを持つ光源であるので、光源との距離によって異なった配光になる。

反射鏡設計で光を所定の方向に正確にコントロールしたい場合には、反射面の切片に対して光源が十分に小さいことが重要になる。正確さのレベルにもよるが、照明器具の配光測定では、照明器具が点とみなせる距離を、照明器具の長辺の5倍以上を推奨していることから、一応これが目安となろう。

3. シミュレーション法

配光予測のための光学シミュレーション方法は、モンテカルロ法とレイトレーシング法を用いたソフトが主流である。

図1 反射鏡の基本曲面（放物線）

図2 反射鏡の基本曲面（楕円）

3.1 モンテカルロ法

モンテカルロ法は、光源から発射された光量子の反射や透過特性を確率的事象（図3）として取り扱う方法である。すなわち、光源からある面に到達した光量子が、その面でどのように透過や反射するかは、あらかじめ設定しておいた確率特性に従うものとして処理される。

最終的には、設定しておいた受光面個々に、いくつの光量子が到達したかを基に配光を予測する。したがって、発射させる光量子の数が増えるほど精度が向上することになる。また、この方法の最大のメリットは、シミュレーションを途中で終了させても、そこまでの結果が有効に利用できる点にある。

3.2 レイトレーシング法

レイトレーシング法は、光源から発射された光線が発散していく過程（図4）を正確に求めようとする方法である。すなわち、光源からある面に到達した光線は、その面の透過や反射特性にしたがって種々さまざまな方向にそれぞれの強さでもって発散していく。この方法は、発散して行く1つ1つの光線個々を所定の反射（透過）回数だけ追跡しようとするものである。

配光は、この場合も同様に、設定しておいた受光面個々に到達した光量から予測する。したがって、反射（透過）回数を多くするほど精度が向上する。この方法は、モン

テカルロ法とは異なり、途中で終了させるとそれまでの計算がまったく無駄になってしまう欠点がある。

4. 計算精度向上のための課題

モンテカルロ法でいくら光量子をたくさん発射させても、また、レイトレーシング法でいくら反射回数を多くしても、これらはコンピュータによる計算処理方法であるので、光源・反射面形状・反射特性などのデータの与え方によって予測精度が異なったものになる。

4.1 光源の大きさ

光を所定の方向に正確に反射鏡設計でコントロールしたい場合には、反射面の切片に対して光源が十分に小さいことが重要になる。しかし、現実問題としてそのように反射鏡が構成されないことが多い。

このような場合には、反射切片に対して光源が点とみなせるように光源を分割してシミュレーションする方法が採られる。図5は、HID光源の発光管の輝度分布（図6）を参考に、2重の円筒光源に分け、それぞれ12本の線光源の組み合わせで、光源をモデル化した例である。図7に示すように、線光源の数が増すほど、合成配光はより現実のものに近いものとなる。

また、線光源も微小面光源の集合体であり、やはりこの分割数が重要になる。市販のソフトでは、どの程度の分割になっているかをあらかじめ把握しておき、精度を向上したい場合には、この分割数を増やす必要が生じる。

図3 モンテカルロ法

図4 レイトレーシング法

図5 光源のモデル化の例

図6 HID光源の発光管の輝度分布

図7 分割数と合成配光

4.2 反射面の分割

反射鏡形状は CAD データで与えるが、それは曲面よりもむしろ微小平面の集合体として記述される場合がほとんどである (図8)。

微小平面の大きさは、光源からの相対距離で決定することが重要である。シミュレーション精度を向上したい場合には、分割した微小光源から微小反射面を見込む立体角ができるだけ小さくなるように分割する。言い換えれば、光源に近いほど細かく、光源から遠ざかるほど粗くても良いということになる。

4.3 反射面の反射特性

一般に、反射面の反射率は、反射面への入射角度に依存して異なり、とくに正反射成分は入射角度が大きくなるに従ってその値が増加する。また、反射率は、光源の波長ごとの反射特性をいう場合と目の感度特性で波長域を積分した視感反射率をいう場合とが混同される場合が多い。

市販ソフトでは、反射率を視感反射率で取り扱うとともに、反射特性を(3)式のような単純な数式として与えるものが大半であり、入射角度を考慮できないものが多い (図9)。

$$I(\theta) = I_d \cdot \cos \theta + I_s \cdot \cos^n(\theta - \alpha) \quad \dots\dots\dots(3)$$

この場合、拡散反射成分 (I_d) を45°入射に対する垂直測定値で、鏡面反射成分 (I_s) を45°入射に対する45°正反射測定値で代用させることが多い。最新のソフトでは、入射角ごとにすべての方向の反射特性をデータとして与え、計算処理できるものも登場してきているが、処理時間に課題がある。

4.4 ガラス面などの透過特性

レンズ系の光学解析ソフトでは、レンズやプリズムで光線がどのように屈折していくかの経路を解析するものがある。しかし、反射鏡による配光を予測するものでは、ガラス内部などでの吸収・散乱が正確に取り扱えない (ガラスの厚みを考慮できない) ものが多く、(3)式の反射光を透過光と読み替えて取り扱うものが大半である。

この場合に最も問題となるのは、ガラス面への入射角

図8 反射面形状の例

図9 Phong のモデル

度が60°~70°を超えると、反射率が急激に増加する特性を考慮できないことである。すなわち、前面ガラス付きの器具の配光を予測した場合に、高鉛直角の光度が大きくなりすぎるという問題が生じる。対策としては、シミュレーション後に、ガラス特性分を修正する方法がよく採られる。

5. おわりに

コンピュータは、データを打ち込みさえすれば、何がしかの結果を出力してくれる。しかし、精度の高いシミュレーションを行うには、プログラムソフトでの照明計算処理上の約束ごとを十分に理解しておくことが大切である。

細かいデータを与えても計算処理がそれに見合った精度のものでなければ、良好なシミュレーション結果は期待できない。市販ソフトを活用するには、ソフトの中身をよく理解しておくことが重要である。