

LED 照明ノーツ 7 ver1.1

<光源光度データからの照度分布の予測>

今回は LED から放射される光を制御して、(LED を複数個配置したり、レンズ、ミラー、拡散シートなどの光学素子を適当な位置に付加したりして、) 所望の照明光を得るための設計・評価技術の基礎となる、光源データ、照度計算の考え方について解説させていただきたい。

1. コンピュータによる照明系の評価

近年の照明系設計においては、光源の比較的近傍においても明るさの分布、照明角度特性の精度の高い評価が求められるため、非常に大量の計算が必要となる。また複雑な発光特性の光源を扱ったり、光源が数多く存在したり、或いは後述の拡散シートやレンズ等の役割も同時評価せねばならず、パソコン等で稼動する照明系評価ソフトウェアと言うものがある程度精度の高い設計には、どうしても必要になる。以下では、LED 製品のカタログ data を基にして光源の基本配置を行い、それをコンピュータによる照度シミュレーションで評価した結果を示す。

本シミュレーションは照明系設計・評価ソフト“照明シミュレーター”¹⁾により行っている。

光源としては日亜化学工業株式会社の LED、NSPWR70CSS-K1²⁾ を採り上げる。この光源が横一列に 7 個、等間隔で並んでいる状態をご想像戴きたい。

2. 光源からの距離と照度分布、照度分布の予測

ここで LED 光源が横一列に並んでいる平面を光源面と呼ぼう。この光源面から適当な距離離れ、光源面に平行な平面(被照明面)を照明する場合を考える。これから説明させていただく照明系において、図 1 はその被照明面上の照度分布を表す。コンピュータ上で非常に多数の光線を光源から発生させその行方を追い(光線追跡)シミュレートしたデータである。等高線の様なもので照度の高低が表されている。照度は単位面積あたりを照射する光のエネルギーを表すので、単純に照度の高い場所は明るく照らされている、と考えて戴いて結構である。

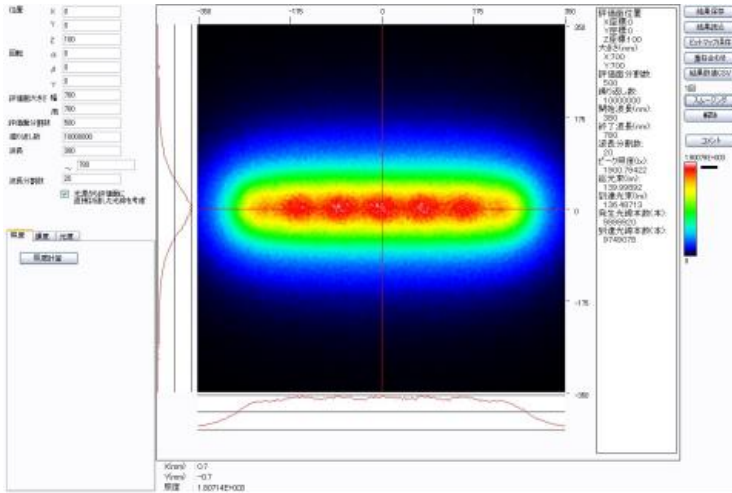


図 1 照度分布予測より定めた光源間隔を用いた照度シミュレーション

図 2 に日亜化学工業 web サイト²⁾ より得られる NS PWR70C S S - K1 の発光角度特性を示す。

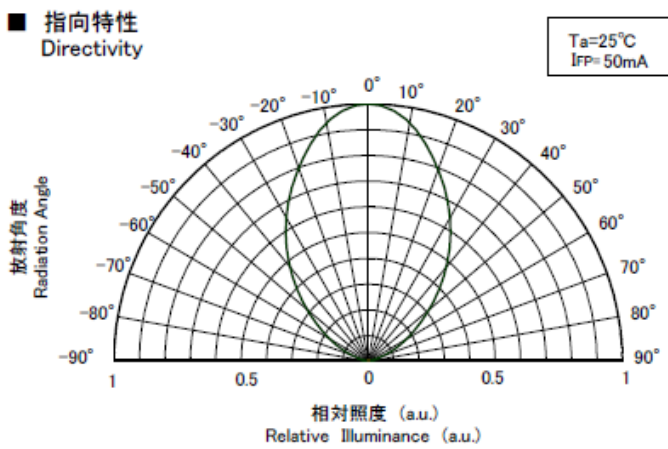


図 2 発光角度分布

この光源単体からどの角度にどのくらいの割合でエネルギーが放射されているか（光度、或いは放射強度）を表している。よく考えてみればカタログ上の、この発光角度特性から、被照明面までの距離 L が定まっていれば、どの位の間隔で LED を並べれば被照明面上の照明（照度）ムラが目立たなくなるかについては、コンピュータを用い無くとも大方は予測できる訳である。ここで、その様な計算に基づき、光源面から被照明面までの距離 L を 100mm とした場合に、光源同士の間隔 d を 80mm と決定した際の照度分布シミュレーション結果が図 1 である（あくまでも照度の分布、被照明面上の照度比率である。）。この計算は行き成り目標に到達できるほど単純なものでは無いが、間隔を調整しながら、何回も検証計算を行い目標に近づく事は可能である。この場合の検証を行なってみると（図 3）、

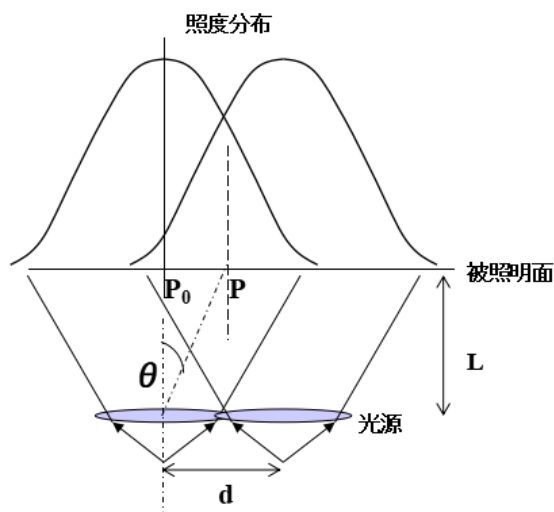


図 3 照度分布の予測

1) $d=80$ とすると、隣り合う光源同士は中心から 40mm はなれた照度分布が被照明面上で重なり合う事になる。この時の光源からこの重なり合う場所 P への光線の射出角度 θ は $\tan \theta = d/(2L) = 40/100$ から求められ、この場合 $\theta = 21.8$ 度と成る。ここで、この角度に従って図 2 の製品 data に照らし合わせると、中心方向に対して 77% 程度の強さの光度 I が出ていることが分かる。像平面上の P における単独光源による照度 E は後述（3. 照度と光度）の通り $\cos^3 \theta$ に比例するので、 P_0 における照度を 1 とした場合に、 $0.77 \times 0.8 = 0.616$ に暗くなる。ただし P では少なくとも二つの光源からの影響が重なり合うので、 $0.616 \times 2 = 1.23$ 程度の明るさとなるであろう。この程度の大雑把な計算でも大体の配置の感覚は掴める。

2) しかしこれだと、光源間の midpoint、つまり照度の谷となるところが、光源小面の peak より 20%程度も明るくなる事になる。もう少し計算精度を上げる事を考えよう。ここで peak 位置 P_0 にそこから 80mm 離れた隣の光源による照度分布の影響は無いかわかるか調べてみよう。 $\tan \theta = d/(2L) = 80/100$ でありますから $\theta = 38.7$ 度である。やはり図 2 から、大略光度比は 50% と見積もれる。従って $\cos^3 \theta$ も考慮して 0.24 程度の照度比が、 P_0 に重なり合っている事になる。隣接光源は 2 つあるので結局 1.48 程度の明るさに P_0 はなっていると見積もることが出来る。

3) さらに精度を上げるならば、P 点における、120mm 離れたところに中心がある照度分布の影響も考慮せねばならない。 $\tan \theta = d/(2L) = 120/100$ 、 $\theta = 50.2$ 度、 $I = 30\%$ とすると照度比は 0.0787、2 倍で 0.157、つまり P 点には、単独光源が齎す最大照度を 1 とした時 1.39 程度の照度が来ている事が予測できる。 P_0 の 1.48 と比較すると可也良い値ではあると思われる。

実際にはさらに遠くの照度分布からの影響も考えられよう。また、光源面積が大きな場合、或いは縦横 2 次元的に光源が並ぶ場合などにおいて計算はどんどん複雑になって行く。その様な場合には照明計算プログラムによる計算が必要となって来る。光路中にレンズ系、ミラー系、拡散系等が存在する場合には、手計算ではさらに予測は困難なものとなって行く。

3. 照度と光度

上記の光度分布データを、光源の配置に役立てるために、光度と照度の関係について考えてみる。

図 4 にある様な、面積 ds の、上述の完全拡散面光源（輝度 B ）でこれに平行に相對する平面を照明した場合には面光源の鉛直方向の面積 dP における照度 E_0 は、輝度に、立体角、光源の面積を乗じ、それを受け取る側の面積で割ってやれば良いので、

$$E_0 = B \frac{dP}{L^2} ds \frac{1}{dP} = B \frac{ds}{L^2}$$

となる。光源面と角度 θ をなす方向の被照明面上の同様の照度 E は、光源の面積としては、 θ 方向から見て、 $\cos \theta$ 分だけ圧縮されて見える面積を採用せねばならないが、 ds 同様、 dP も歪んで見えて、あとは上式と同様に考えて。

$$E = B \frac{dP \cos \theta}{\left(\frac{L}{\cos \theta}\right)^2} ds \cos \theta \frac{1}{dP} = B \frac{ds}{L^2} \cos^4 \theta$$

である。従って $E = E_0 \cos^4 \theta$ の関係になる。

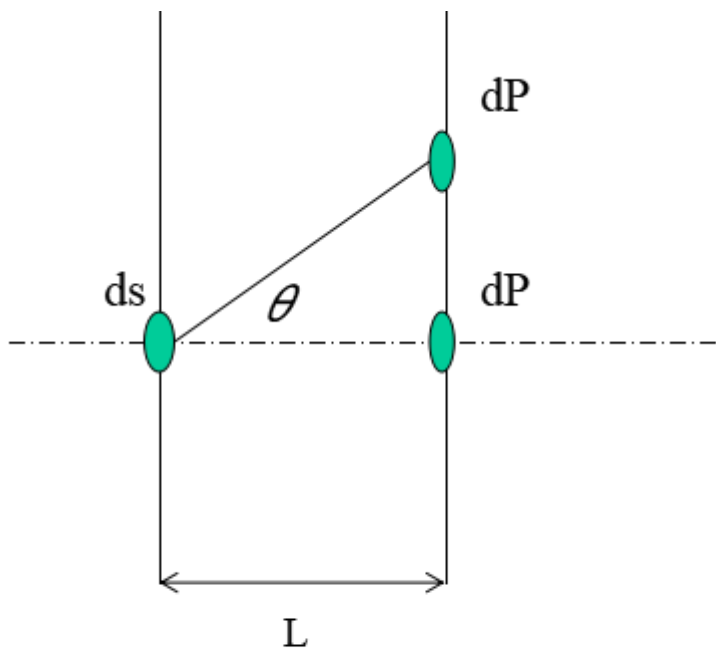


図 4 向かい合う平面上の照度

もし完全拡散面光源ではなく、面法線に対する角度 θ 方向への光度の、中心方向 ($\theta = 0$) への光度との比が $I(\theta) = I_0/I_\theta$ であるような光源を用いれば、 k を比例定数として

$$E_0 = kI_0 \frac{dP}{L^2} ds \frac{1}{dP} = kI_0 \frac{ds}{L^2}$$

と置く。ここでは、光源は面積を持っているのでどうしても光度を面積的な広がり結び付けなくてはならない。光度は本来、点光源に対して、あるいは光源を非常に遠方から測定した場合に定義される量であるから、面積と結びつく照度を、そこから導き出す場合には少し工夫をする必要がある。光度の単位は光束／立体角なので、ここからはどのくらいの大きさの光源からどのくらいのエネルギーが出てくるかを知ることはできない。そこで、もし、被照明面上の照度の比を考えるのであれば、画面上のごく微小な面積から射出する光の立体角度毎の光束の分布は、光源を無限遠においた時の厳密な光度（放射強度）分布と同じプロポーシオンを持つであろう、と考える。その光度分布が光源面上の各微小部分で一定に保たれているとすれば、上記の光源微小面積と単位面積との比を k として全面積 ds 、そして立体角に乘じることにより、全光束が得られる。さて、軸外については、光源の面積だけが問題になるので $\cos \theta$ の効果を考える必要がなくて（光度は、特定の方向に流れ出る明るさそのものである）、光源の見た目の面積に影響を受けない、

$$E = kI_0 \frac{dP \cos \theta}{\left(\frac{L}{\cos \theta}\right)^2} ds \frac{1}{dP} = kI_0 \frac{ds}{L^2} \cos^3 \theta$$

$$E = E_0 I(\theta) \cos^3 \theta$$

となる。光源の配置計算では、 $I(\theta)$ に図 2 にある分布をあてはめ、この関係式を用いている。完全な点光源のように、光度に指向性が無ければ $I(\theta) = 1$ となり、 E は E_0 に $\cos^3 \theta$ を乗じたものと成る。

3. 汎用的な光源の設定方法

ここまでは、光源メーカー等の光度分布データをもとに照度分布評価を行うことを考えてきたが、照明計算プログラムで多く取り入れられている基本的な光源データ入力の方法について説明させていただく。

簡単に言えば、上記の光度と、光源単位面積当たりからどのくらいの光束（測光量ではルーメン）が放射しているかの二つの量が分かればよい。後者は光束発散度（測光量）、或いは放射量では放射発散度と呼ばれる。光源の面積が分かっている、その面内で発散度の偏りが無ければ、光源面全体から放射する光束を入力すれば良いことになる（カタログ等に出ている総放射量である。）。光源面内で、放射角度の偏り、或いは場所による発散度の偏りがあれば、図 5 にある様に、光源を幾つかのセクションに分けて、個別の光度と放射発散度を入力する。図 (a) (b) は分かりやすいように微小光源間に距離をとったかどうかが異なる。

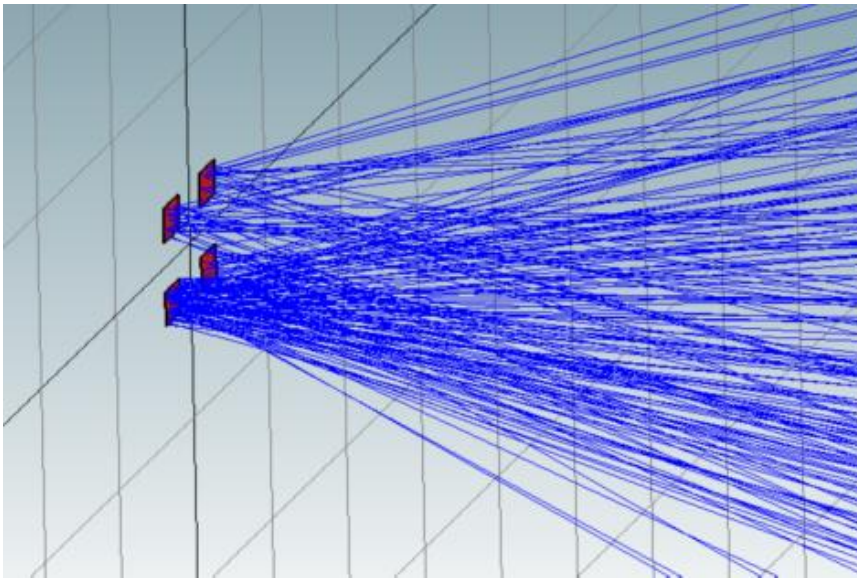


図 5 (a)

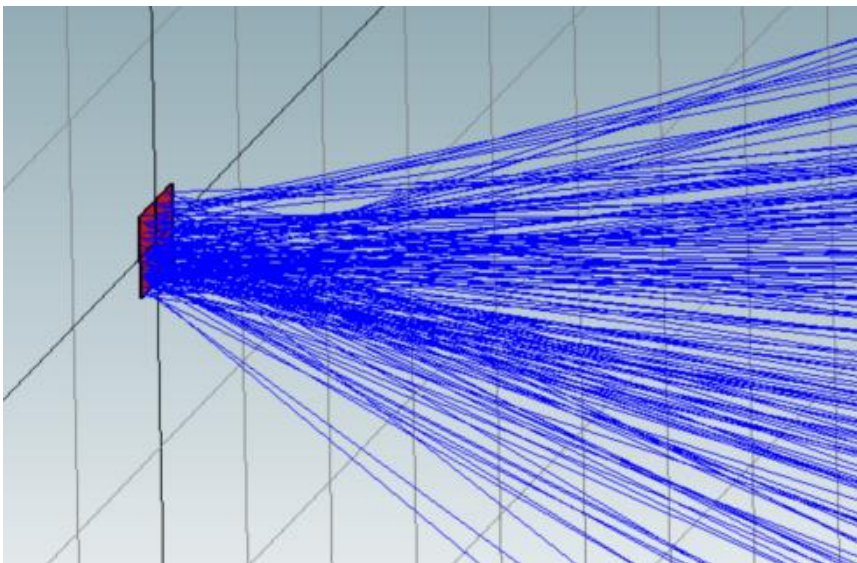


図 5 (b)

5. 参考文献

- 1) 照明 simulator、(株)オプティカルソリューションズ <https://www.osc-japan.com/ssc/>
- 2) 日亜化学工業(株) http://www.nichia.co.jp/specification/jp/led_09/NSPWR70CSS-K1.pdf
- 3) 牛山善太、草川徹：シミュレーション光学（東海大学出版会、東京、2003）

執筆者：牛山 善太

博士（工学）

元東海大学工学部光・画像工学科（レンズ設計）非常勤講師

(株)タイコ 代表取締役

(株)オプティカルソリューションズ 顧問

提供：

株式会社オプティカルソリューションズ

TEL: **03-5833-1332**

Mail: info@osc-japan.com

Web: <http://www.osc-japan.com>

〒101-0032

東京都千代田区岩本町 2-15-8 MAS 三田ビル 3 階