電飾看板発光面の輝度分布簡易予測法について

正会員 内田 暁（日本大学） 正会員 浜元 貴徳（株式会社日本理工出版会）

終身会員 松浦 正博（日本大学） 専門会員 大谷 義彦（日本大学）

On the Simple Prediction Method for Luminance Distribution on Luminous Surfaces of Lit Sign

Member Akira Uchida (Nihon University), Member Takanori Hamamoto (Nihonriko Shuppankai Corporation),
Life Member Masahiro Matsuura (Nihon University) and Fellow Member Yoshihiko Ohtani (Nihon University)

ABSTRACT

In the luminance distribution of a lit sign, having no irregularities in brightness is desirable, that is, the uniformity ratio of the luminance should be good. The uniformity ratio is decided by various factors such as the number of lamps, the spacing of the lamps, the distance between the light source and the luminous surface, the inner surface reflectance, and the luminous surface reflectance. A simple prediction method to obtain the relationship between these factors and the uniformity ratio of the luminance was tested by using calculations on a two-dimensional surface. We found that the method was suitable, because the calculated and experimental results agreed with each other.

KEYWORDS : Lit sign, Luminance distribution, Uniformity ratio of luminance

1. 緒言

広告媒体として用いられている電飾看板は、その発光面の明るさにムラの少ないことが望まれており、さらに省エネルギーの面から看板装置奥行を浅くしたり、光源の数を少なくすることが要求されている。筆者らは、これらのことを考慮に入れた電飾看板を設計する際に必要となる資料を得るために電飾看板実験装置による実験を重ねてきた¹⁾²⁾。しかしながら発光面の明るさのムラを生じさせる要因として、ランプの数と間隔（ランプピッチ）、ランプと発光面との距離（看板深さ）、看板内面反射率、看板内反射面の形状、発光面となるアクリル乳白板の種類と厚みなどと要因が多く、実験で対応するのがはなはだ困難であった。

そこで、コンピュータを用いた計算により予測する方法について検討することとした。予測計算において電飾看板装置そのままを三次元とするとかなり複雑になるので、電飾看板装置の一断面に注目した二次元として扱う簡易予測法を試みた。実験より得られた値と比較したところ満足のいく結果³⁾⁴⁾であることが認められたので報告する。

2. 簡易予測法の考え方

2.1 電飾看板模型の設定

すでに実験で用いている図1に示すような電飾看板実験装置と同一の寸法の電飾看板模型を考え、簡易予測法を試みる対象とした。すなわち、間口90 cm、奥行25 cm、高さ150 cmの直方体室内に40W蛍光ランプを6本まで設定できるようにしたもので、ランプピッチならびに看板深さは任意に設定できるものとした。

また、電飾看板模型の正面は90 cm×135 cmのアクリル乳白板を取り付け、発光面とした。

図1 電飾看板実験装置

Fig.1 The experimental apparatus of lit sign.

2.2 無限長電飾看板模型の設定

設定した電飾看板模型の発光面における輝度分布の計算を二次元で行うために、ランプを含めた電飾看板模型をランプの長さ方向に無限長とする無限長電飾看板模型を想定した⁵⁾。この場合の無限長のランプと第二光源となる内面を細分割して得られる平ひも状光源による照度計算について考えてみる。

本論文の一部は平成14年度照明学会全国大会で浜元貴徳が講演した。

まず、図 2 に示すような長さ l に比べてその半径が十分小さな均等拡散性の円柱光源（ランプ）が水平にある場合、光源の一端を含む垂直平面内の点 P における水平面照度 E_{h1} 、鉛直面照度 E_{v1} を求めると式(1)、(2)のようになる⁶⁾。

$$E_{h1} = \frac{I}{2} \left(\frac{l}{h^2 + d^2 + l^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + d^2}} \tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$E_{v1} = \frac{I}{2} \left(\frac{l}{h^2 + d^2 + l^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + d^2}} \tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \cdot \sin \theta \quad (2)$$

ただし、 I は単位長さあたりの光源軸に垂直な方向の光度である。

ここで、光源の長さを無限長とすると、水平面照度 E'_{h1} 、鉛直面照度 E'_{v1} は式(3)、(4)となる。

$$E'_{h1} = \frac{I\pi}{2\sqrt{h^2 + d^2}} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

$$E'_{v1} = \frac{I\pi}{2\sqrt{h^2 + d^2}} \cdot \sin \theta \quad (4)$$

図 2 円柱光源による照度
Fig.2 Illuminance of cylindrical light source.

次に、図 3 に示すような長さ l に比べてその幅が十分小さな均等拡散性の平ひも状光源が水平にある場合、光源の一端を含む垂直平面内の点 P における水平面照度 E_{h2} 、鉛直面照度 E_{v2} を求めると式(5)、(6)のようになる⁶⁾。

$$E_{h2} = \frac{Ih}{2(h^2 + d^2)} \left(\frac{l\sqrt{h^2 + d^2}}{h^2 + d^2 + l^2} + \tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$E_{v2} = \frac{Ih}{2(h^2 + d^2)} \left(\frac{l\sqrt{h^2 + d^2}}{h^2 + d^2 + l^2} + \tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \cdot \sin \theta \quad (6)$$

ただし、 I は単位長さあたりの光源面の法線方向の光度である。
ここで、光源の長さを無限長とすると、水平面照度 E'_{h2} 、鉛直面照度 E'_{v2} は式(7)、(8)となる。

$$E'_{h2} = \frac{Ih\pi}{2(h^2 + d^2)} \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$E'_{v2} = \frac{Ih\pi}{2(h^2 + d^2)} \cdot \sin \theta \quad (8)$$

無限長の円柱光源（ランプ）と平ひも状光源の照度には、式(3)、(4)、(7)、(8)により明らかなように光源の長さ方向に関する変数を含んでいないので、光源の長さ方向に垂直となるいかなる断面を

とっても同一照度となる。したがって、電飾看板模型を無限長とすれば、図 4 のような二次元面だけを扱う簡単な計算で済むことになる。

図 3 平ひも状光源による照度
Fig.3 Illuminance of ribbon-shaped light source.

図 4 無限長電飾看板模型の二次元面
Fig.4 Two-dimensional surface of infinite lit sign model.

2.3 相互反射を考慮した計算

無限電飾看板模型において発光面を下部とした場合の断面を図 5 に示す。発光面の幅は 90 cm、発光面からランプ中心までの距離（看板深さ）は最大 20 cm で可変であるものとし、ランプ中心から背面までの距離は 5 cm と一定である。発光面の反射率と透過率、発光面を除く内面の反射率は任意に与えられるものとし、発光面を含む内面すべてを均等拡散面とした。またランプの数も任意に与えられるが、ランプピッチの設定に際しては、ランプの数に対応して等間隔とし、ランプと側面との間隔はランプピッチの 1/2 になるようにした。なお、これからの説明に必要となるので、無限電飾看板模型断面の左下隅を原点 O とする XY 直角座標系を設定した。

図 5 電飾看板模型の断面ならびに粒子の軌跡
Fig.5 Cross section of lit sign model and locus of particle.

この電飾看板模型の断面内での相互反射の計算はモンテカルロ法で行うこととした^{7)~9)}。モンテカルロ法というのは、乱数を用いた統計的計算手法の総称である。すなわち、光源から放射される光束を多数の粒子の集合として取り扱い、その各粒子の飛行軌跡を最後まで追跡するのであるが、光源から放射される粒子の

方向や、内面における反射後の粒子の方向、さらに内面での反射、透過、吸収の判別を乱数による確率分布により決定しているのである。そして、三次元面において面素といっているものに対応して二次元断面の輪郭を線素に分けておけば、それぞれの線素へ衝突した粒子の数による密度が照度に比例することになり、また各面とも均等拡散性であることから輝度にも比例するものとなる。

図 5 に示すランプから放射される粒子の放射角 θ_0 は、 $0 \sim 2\pi$ [rad] の範囲で一様に分布することから、乱数 ξ との関係は

$$\theta_0 = 2\pi\xi \tag{9}$$

で与えられ、均等拡散性の内面で反射した後の粒子の方向 θ_r と乱数 ξ との関係 η は

$$\theta_r = \sin^{-1} \sqrt{\xi} \tag{10}$$

で与えられる。粒子は直進するので、放射あるいは反射後の衝突点は幾何学的に簡単に求めることができる η 。また、反射、透過、吸収の判別は、反射率を ρ 、透過率を τ 、吸収率を α とするならば

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \xi < \rho &: \text{反射} \\ \rho \leq \xi < \rho + \tau &: \text{透過} \\ \rho + \tau \leq \xi < 1 &: \text{吸収} \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

ただし、 $\rho + \tau + \alpha = 1$

とすればよい。

3. 簡易予測法の検証

3.1 直接照度による検証

モンテカルロ法による照度計算の妥当性および精度を確認するためと最適な初期放射粒子数を定めるために、発光面を含む内面反射率を 0% とした場合のモンテカルロ法による計算結果と式(3)による直射照度の計算結果とを比較した。

図 6 (a) は、発光面上 (X 軸上) における、粒子数を 20 万個と 2 億個とした場合のモンテカルロ法の計算結果と式(3)による直射照度の計算結果であり、同 (b) は、式(3)による直射照度の計算結果を真値とした場合のモンテカルロ法の計算結果の誤差率を示したものである。平均誤差率を求めると、粒子数 20 万個の場合 2.88%，2 億個では 0.10% であり、誤差率を $1/n$ 倍とするには粒子数を n^2 倍に増やさねばならないとするモンテカルロ法の理論 $^{10)}$ にほぼ一致している。

図 7 は、初期放射粒子数に対する平均誤差率と Celeron 1000 MHz を搭載した PC による計算時間を表したものである。計算時間で見ると、粒子数 2000 万個では約 20 sec、2 億個では約 200 sec であることから、粒子数に比例して計算時間が増加していることがわかる。

以上の結果に基づき、計算精度と計算時間双方の面から考えて、初期放射粒子数は平均誤差率 0.25%，計算時間約 20sec の 2000 万個として計算を行うこととした。

3.2 実験による検証

相互反射を含めたモンテカルロ法による計算結果の検証は、いかなる計算によっても真値を得ることができないので、図 1 に示した電飾看板実験装置発光面のランプに直角な中央線上における輝度の測定値との比較により行うこととした。測定に際しては、照度計の受光面 (直径 1cm) を発光面であるアクリル乳白板に密着させて行った。得られた値は光束発散度に相当するが、アクリル乳白板を均等拡散面とみなし輝度と比例するものとして扱った。

(a) 相対照度
(a) Relative illuminance

(b) 誤差率
(b) Error rate

図 6 モンテカルロ法と直射照度計算による結果
Fig.6 Results by Monte Carlo Method and direct illuminance calculation.

図 7 粒子数に対する誤差率と計算時間
Fig.7 Error rate and CPU time to the number of particle.

図 8 (a), (b) は、ランプ 4 本 (ランプピッチ 23 cm)、発光面反射率 25% とし、看板深さをパラメータとした場合の看板発光面の X 座標に対する輝度の計算値と測定値を相対値で表したものである。(a) は発光面を除く内面の反射率 (本論では、今後はこれを内面反射率と称することとする) が 0%，(b) は 90% の場合のものである。

これらのような分布をランプの数が 2 本、3 本、5 本、6 本の場合も同様に求め、測定値を真値として平均誤差、平均誤差率を計算して整理したのが図 9 (a), (b) である。(a) の平均誤差では、内面反射率が 90% の場合、看板深さが 5 cm では 0.03~0.05 の範囲、

(a) 内面反射率 0% の場合
(a) In the case of inner surface reflectance is 0%

(b) 内面反射率 90% の場合
(b) In the case of inner surface reflectance is 90%

図 8 計算および測定より得た相対輝度 (ランプ 4 本, 発光面反射率 25%)
Fig.8 Relative luminance obtained by calculation and measurement (Number of lamps is 4, luminance surface reflectance is 25%).

看板深さが 20 cm では 0.01~0.02 の範囲であり、看板深さが小さい方が平均誤差はやや大きく、ランプの数による平均誤差の変化は少ない。内面反射率が 0% の場合、看板深さが 5 cm, 20 cm の両方を含めても 0.01~0.03 の範囲であり、看板深さ、ランプの数による平均誤差の変化は少ない。図 9(b) の平均誤差率では、同(a) の平均誤差の傾向と似ており、内面反射率が 90% の場合、看板深さが 5 cm では 5~7% の範囲、看板深さが 20 cm では 1~2% の範囲であり、内面反射率が 0% の場合、看板深さが 5 cm, 20 cm の両方を含めても 2~4% の範囲である。

ある面の明るさのムラを表すのに輝度均斉度が用いられており、いろいろと定義されている¹¹⁾。ここでは、電飾看板製作現場でも簡単に求められるようなことを考慮に入れて、最大輝度に対する最小輝度で表す輝度均斉度を採用した。また、計算の場合が二次元であるため、面上でなく直線上で取り扱うことになるので、本論では特に「簡易輝度均斉度」と呼称することとした。

図 10(a), (b) は、発光面反射率を 25% とし、看板深さをパラメータとした場合のランプの数 (ランプピッチ) に対する計算値からと測定値からの簡易輝度均斉度を表しており、(a) は内面反射率 0%, (b) は 90% である。図 10(a) の内面反射率 0% の測定値を見ると、看板深さ 20 cm ではランプの数に関わらず簡易輝度均斉度は約 0.7 と一定であるが、看板深さ 5 cm ではランプの数 2 本で簡易輝度均斉度は約 0.1, 6 本で約 0.57 と比例的に増加している。計

(a) 平均誤差
(a) Average error

(b) 平均誤差率
(b) Average error rate

図 9 ランプの数に対する誤差 (発光面反射率 25%)
Fig.9 Error to the number of lamp (Luminance surface reflectance is 25%).

算値は、測定値と比べて看板深さ 20 cm では 0.01~0.10 の範囲で大きな値となっているが、看板深さ 5 cm ではよく一致している。(b) の内面反射率 90% の測定値を見ると、看板深さ 5 cm, 20 cm における傾向は内面反射率 0% と同じであるが、全体的に簡易輝度均斉度が約 0.2 大きくなっていることがわかる。計算値は、測定値と比べて看板深さ 20 cm では 0.03~0.05 の範囲で大きな値となっているが、看板深さ 5 cm ではよく一致している。

図 11 は、ランプの数 2, 3, 4, 5, 6 本, 発光面反射率 25%, 内面反射率 0, 30, 60, 90%, 看板深さ 5, 10, 15, 20 cm の組合せにおける、測定値からの簡易輝度均斉度に対する計算値からの簡易輝度均斉度の関係を表したものである。簡易輝度均斉度が 0.7 以上で計算値からの方がやや大きくなっているが、平均誤差は 0.035, 平均誤差率は 5.3% である。

3.3 まとめ

モンテカルロ法において用いる粒子数は、モンテカルロ法による計算結果と直射照度の計算結果を比較検討して、平均誤差率 0.25%, 計算時間約 20 sec である 2000 万個を採用した。

これに基づくモンテカルロ法による計算結果と、電飾看板実験装置による実験結果とを比較検討したところ、簡易輝度均斉度において測定値に対する計算値の平均誤差は 0.035, 平均誤差率は 5.3% であることが明らかとなった。

したがって、無限長電飾看板発光面に対してモンテカルロ法を用いた輝度分布ならびに簡易輝度均斉度を予測する方法は十分に有効であると判断し、今後の計算を進めていくこととした。

(a) 内面反射率 0% の場合
(a) In the case of inner surface reflectance is 0%

(b) 内面反射率 90% の場合
(b) In the case of inner surface reflectance is 90%

図 10 ランプの数に対する簡易輝度均斉度 (発光面反射率 25%)
Fig.10 Simple uniformity ratio of luminance to number of lamps (Luminance surface reflectance is 25%).

図 11 測定値からの簡易輝度均斉度に対する計算値からの簡易輝度均斉度
Fig.11 Simple uniformity ratio of luminance from calculation values to that from measurement values.

4. 簡易予測法の活用例

まず、輝度分布の場合の一例を図 12(a), (b)に示す。(a)は、ランプの数 4 本、発光面反射率 25%、看板深さ 5 cm と一定で、内面反射率をパラメータとした場合の発光面の X 座標に対する相対輝度である。光源と発光面が近いと輝度のムラが大きく、光源

の数が 4 本であることを明らかに示している。しかしながら、内面反射率を高くすれば輝度のムラが改善されることもわかる。(b)は、ランプの数 4 本、発光面反射率 25%、内面反射率 90% と一定で、看板深さをパラメータとした場合の発光面の X 座標に対する相対輝度である。看板深さを大きくとることにより、輝度ムラがなくなることを示している。

(a) 看板深さ 5cm とし、内面反射率をパラメータとした場合
(a) In the case of depth of signboard is 0% and a parameter is inner surface reflectance

(b) 内面反射率を 90% とし、看板深さをパラメータとした場合
(b) In the case of inner surface reflectance is 90% and a parameter is depth of signboard

図 12 相対輝度分布の計算結果の一例(ランプの数 4 本、発光面反射率 25%)
Fig.12 Examples of relative luminance distribution (Number of lamps is 4 and luminance surface reflectance is 25%).

次に、簡易輝度均斉度の場合の一例を図 13(a), (b)に示す。(a)は、ランプの数 4 本、発光面反射率 25% と一定で、看板深さをパラメータとした場合の内面反射率に対する簡易輝度均斉度であり、看板深さと内面反射率が高くなると簡易輝度均斉度が良くなるが、看板深さについては高くとり過ぎると簡易均斉度がやや下がることを示している。(b)は、ランプの数 4 本、発光面反射率 25% と一定で、内面反射率をパラメータとした場合の看板深さに対する簡易輝度均斉度であり、(a)で述べた看板深さと簡易輝度均斉度との関係を明らかに示している。

また、図 14 は、内面反射率 90% と一定で、ランプの数をパラメータとした場合の、簡易輝度均斉度が 0.85 となるための発光面反射率に対する看板深さを表したものである。計算点としている発光面反射率 7%、25%、72% はそれぞれアクリル乳白板 #422、#432、#430 (いずれも厚さ 5 mm、三菱レイヨン株式会社製) に対応している。このような図によれば、必要とする簡易輝度均斉

度、アクリル乳白板の種類、ランプの数を定めることにより、適切な看板深さを読み取ることができる。

(a) 内面反射率を変化させた場合
(a) In the case of varied inner surface reflectance

(b) 看板深さを変化させた場合
(b) In the case of varied depth of signboard

図 13 簡易輝度均斉度の計算結果の一例

Fig.13 Examples of calculation results about simple uniformity ratio of luminance.

図 14 発光面反射率に対する看板深さ (簡易輝度均斉度 0.85 の場合)

Fig.14 Depth of signboard to luminance surface reflectance (In the case of simple uniformity ratio of luminance is 0.85).

5. 結言

電飾看板発光面の輝度分布を簡易な計算により予測する方法を試み、電飾看板実験装置を用いた測定値との比較により、満足のいく方法であることが明らかとなった。今回は予測結果の一例を示したにすぎないが、今後はランプピッチ、看板深さ、看板内面反射率、看板内反射面の形状、発光面となるアクリル乳白板の種

類と厚みなどの条件を種々設定した計算を行い、電飾看板の設計製作に際して役に立つ資料をまとめるつもりである。

さらに、明るさのムラを判断するのはあくまで人間の目であることから、目視による実験により、実際に目で見たところの発光面の明るさのムラと簡易輝度均斉度との関係を求めなければならないと考えている。

謝辞

本研究遂行に際して、古河電気工業株式会社岡田光範氏、監物孝明氏、株本昭氏、永島和也氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 大谷, 松浦, 内田, 岡田, 株本: 電飾看板発光面の輝度均斉度について, 第 19 回電気設備学会全国大会講演論文集, pp. 161~162 (平成 13 年).
- (2) 大谷, 内田, 松浦, 浜元: 電飾看板発光面の輝度分布測定について, 第 20 回電気設備学会全国大会講演論文集, pp.79~82 (平成 14 年).
- (3) 浜元, 内田, 大谷, 松浦, 岡田, 株本: 電飾看板発光面の輝度分布シミュレーションについて, 平成 13 年度 (第 27 回) 照明学会東京支部大会講演論文集, pp.24~25 (平成 13 年).
- (4) 浜元, 内田, 大谷, 松浦: 電飾看板発光面の輝度分布シミュレーションについて—看板内面反射率を変化させた場合—, 平成 14 年度照明学会 (第 35 回) 全国大会講演論文集, pp.114~115 (平成 14 年).
- (5) Ohtani, Y. et al: Shadow Characteristics of a Column in an Infinite Length Room, J. Light & Vis. Env. 17-1, pp.93~108 (1993).
- (6) たとえば, 照明学会編: ライティングハンドブック, オーム社, pp.224~225 (昭和 62 年).
- (7) Tregenza, P.R.: The Monte Carlo Method in Lighting Calculation, Light .Res. Technol., 15-4, pp.163~170 (1983).
- (8) 長田: モンテカルロシミュレーションによる無限長室内空間の照度分布計算, 照明学会誌, 71-6, pp.349~354 (1987).
- (9) 大谷, 増子, 山家: 直方体模型室における影の特性について, 電気設備学会誌 17-8, pp.799~808 (1997).
- (10) 津田: モンテカルロ法とシミュレーション (改訂版), 培風館, pp.84~106 (1977).
- (11) 照明学会編: 照明用語事典, オーム社, p.24 (1990).

(受付日 2003 年 5 月 27 日 / 採録日 2003 年 7 月 4 日)