高天井用照明器具の配光に関する研究

日大生産工（院）　　　　○佐藤　一樹
日大生産工　　　内田　暁、大谷　義彦

1. はじめに

工場などの高天井に設置されている照明器具は数多く使われている。作業面での照度のムラは疲労や事故の原因となり、ランプの効率の良し悪しが大きな課題となっている。

そこで、本研究はランプと反射笠によって生じる被照面上の照度分布をモンテカルロ法により求め、作業面に対してムラのない照明器具の形状を開発することを目的としている。

本報告では、ランプからの配光に焦点を当て、さまざまな配光をモンテカルロ法 [1]を用いて模擬した。またそれらを理論値と比較し、どの配光が作業面に対してムラがないかを検討した。

2. 計算の概要 [1]

2.1　計算の流れ

モンテカルロ法とは乱数を用いた統計的計算手法の総称である。この方法を用いた照度計算は、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模擬するものである。

はじめに、反射笠、作業面の寸法、光源から放射する粒子数を任意で与える。光源から放射される粒子の方向は鉛直角θ_s、水平角 ϕ_s で構成され、これらを乱数により決定する。また、粒子が反射笠や作業面に入射した場合の反射、吸収の判別も乱数により決定する。すべての粒子が放射し吸収されるまで計算を繰り返す。

2.2　配光の模擬式

配光とは、一般的にランプや照明器具の光度の角度に対する変化、または分布のことを指す。以下に、さまざまな配光について示す。

2.2.1　均等拡散配光

式(1)に均等拡散光源の配光式を示す。

$$I_\theta = I_0 \cos\theta \qquad (1)$$

ただし、θ は鉛直角

I_0は鉛直角方向 0°の光度

I_θは鉛直角θ 方向の光度

下半球の全放射光束は、式(2)のようになる。

$$F(\theta,\phi) = \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} I_\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \qquad (2)$$

一様乱数ξと対応させ正規化し、鉛直角θ_sは式(3)で与えられる。

$$\theta_s = \sin^{-1}\sqrt{\xi} \qquad (3)$$

水平角ϕ_sは 0～2π(rad)の範囲で変化し、光束はこの範囲で一様に分布しているので、水平角方向の放射角ϕ_sは一様乱数ξより式(4)で与えられる。

$$\phi_s = 2\pi\xi \qquad (4)$$

均等拡散の配光の分布を図 1 に示す。値は最大光度を基準とした相対値で示した。

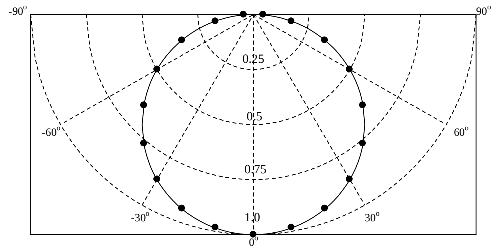

図 1　均等拡散配光

2.2.2　半球拡散配光 [2]

式(5)に半球拡散光源の配光式を示す。

$$I_\theta = I_0 \qquad (5)$$

式(2)に式(5)を代入し下半球の全放射光束を求め、一様乱数ξと対応させ正規化すると鉛直角θ_sは式(6)で与えられる。

$$\theta_s = \cos^{-1}(1-\xi) \qquad (6)$$

水平角は均等拡散配光と同様に式(7)で与えられる。

$$\phi_s = 2\pi\xi \qquad (7)$$

半球拡散の配光の分布を図 2 に示す。鉛直角が 0 度から 90 度まですべて均一な光度の配光となる。

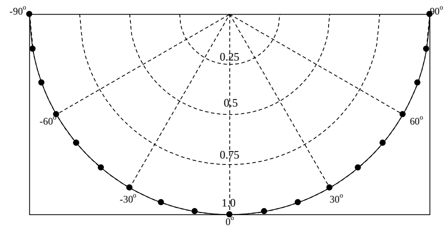

図 2　半球拡散配光

Research on distribution of luminous intensity with luminaire for high celling

Kazuki SATO, Akira UCHIDA and Yoshihiko OHTANI

2.2.3　全球拡散配光[2)]

式(8)に全球拡散光源の配光式を示す。

$$I_\theta = I_0 \tag{8}$$

式(2)に式(8)を代入し全球の全放射光束を求め、一様乱数ξと対応させ正規化すると鉛直角θ_sは式(9)で与えられる。

$$\theta_s = \cos^{-1}(1-2\xi) \tag{9}$$

また、水平角は均等拡散光源と同様に式(10)で与えられる。

$$\phi_s = 2\pi\xi \tag{10}$$

全球拡散の配光分布を**図 3** に示す。鉛直角が 0 度から 180 度すべて均一な光度の配光となる。

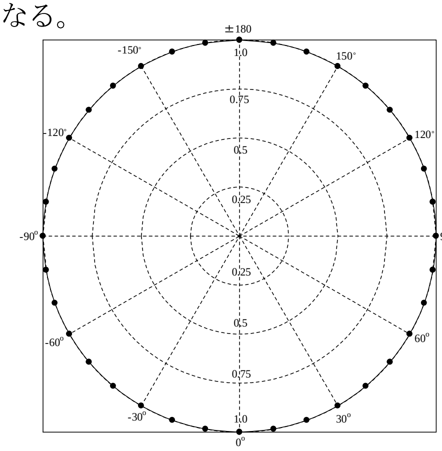

図 3　全球拡散配光

2.2.4　非均等拡散配光[3)]

非均等拡散光源の配光式を式(11)に示す。

$$I_\theta = I_0 \cos^n \theta \tag{11}$$

ただし、n を次数とする。

式(2)に式(11)を代入し下半球の全放射光束を求め、一様乱数ξと対応させ正規化すると鉛直角θ_sは式(12)で与えられる。

$$\theta_s = \cos^{-1}(1-\xi)^{\frac{1}{n+1}} \tag{12}$$

非均等拡散の n=1,3,5 のときの配光分布を**図 4** に示す。均等拡散配光より指向性が狭い配光を模擬した。n の値を増加させると指向特性が狭くなることが確認できる。

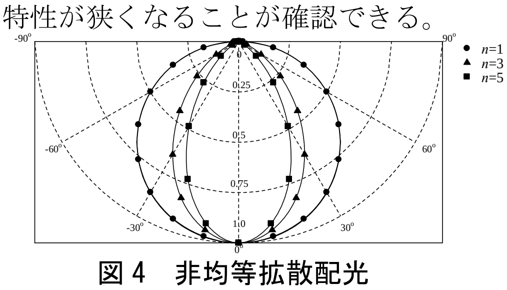

図 4　非均等拡散配光

2.2.5　非全球拡散配光[3)]

非全球拡散光源の配光式を式(13)に示す。

$$I_\theta = I_0(a + b\cos\theta) \tag{13}$$

ただし、a,b を変数とする。

式(2)に式(13)を代入し下半球の全放射光束を求め、一様乱数ξと対応させ、正規化すると鉛直角θ_sは式(14)で与えられる。

$$\theta_s = \cos^{-1}\left\{\frac{-a+\sqrt{a^2+b(2a+b)(1-\xi)}}{b}\right\} \tag{14}$$

となる。

非全球拡散の a=1,b=0.1,1,2,のときの配光分布を**図 5** に示す。均等拡散配光より指向特性が広い配光となる。b の値を減少させるにつれて指向特性が広くなっていることが確認できる。

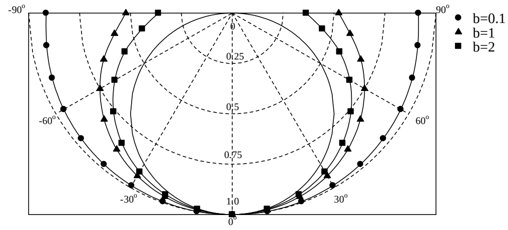

図 5　非全球拡散配光

以上の配光を用いて、理論値と比較し、作業面でのムラの検討を行う。

3. 放射粒子数の検討

モンテカルロ法を用いた照度計算は、放射する粒子数を増加させることにより誤差率を減少させることができるが、計算時間は増加してしまう[4)]。

そこで光源から放射される粒子数を変化させたときの照度の平均誤差率特性と、各粒子数ごとの計算時間特性を示し、今後の計算で使用する際に適していると思われる粒子数を検討した。

作業面及び反射笠の概要を**図 6** に示す。間口、奥行き 60 の作業面を考え、高さ 60 の位置に間口、奥行き、高さ共に 1 の反射笠を作業面の中心に設置した。光源の位置は(30,30,61)である。また、光源は点光源とし、今回は反射笠の反射率はないものとして考えた。

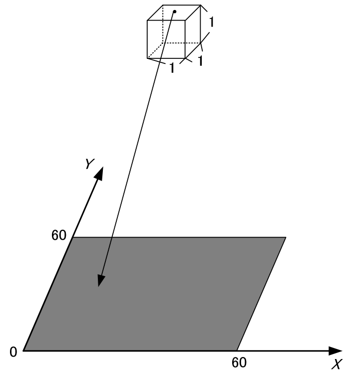

図 6 作業面及び反射笠の概要

図 7 に均等拡散配光で放射したときの計算

時間特性を示す。粒子数にほぼ比例して計算時間も増加している。

また、図 8 に同じく均等拡散配光で放射したときの計算値と理論値と比較した平均誤差率特性を示す。理論値は逆 2 乗の法則と入射角余弦の法則を用いて求めた [5]。平均誤差率は放射される粒子数に反比例して小さくなっている。

これらの結果から、粒子数が 3 億個より増えると平均誤差率の変動は 20 億個まで 0.23[%]しか変化しないため、計算時間や他の配光のことも考慮し、今回は粒子数 3 億個として計算を行うこととする。

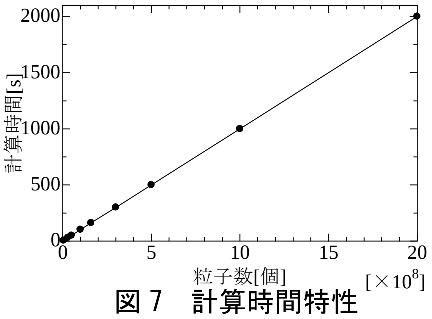

図 7　計算時間特性

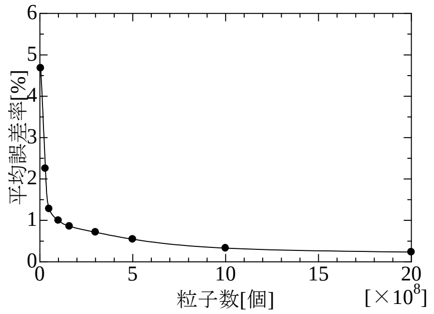

図 8　平均誤差率特性

4. 結果と検討

4.1　理論値との比較 [6]

式(3),(6),(9)を用いてモンテカルロ法で模擬した配光と理論値を相対値で比較した。図 1 の均等拡散配光と理論値との平均誤差率は 0.62[%]となり、図 2 の半球拡散配光のときは 0.36[%]、図 3 の全球拡散配光のときは 0.34[%]となった。

次に式(11)を用いて非均等拡散配光のモンテカルロ法による計算値と理論値を比較した。図 9 に n の値を 3,10 にしたときの配光を示す。

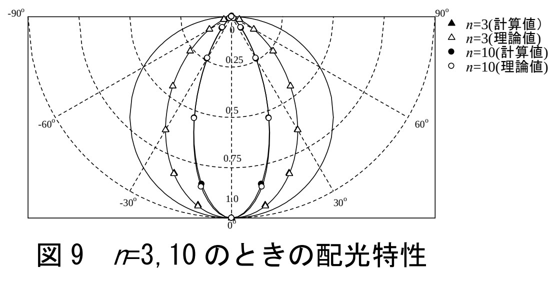

図 9　n=3, 10 のときの配光特性

n の値を 3 にしたときは 3.62[%]、n の値を 10 にしたときは 90.33[%]となった。このように n の値を変化させると平均誤差率も変化するので、図 10 に n の値に対する平均誤差率特性を示した。

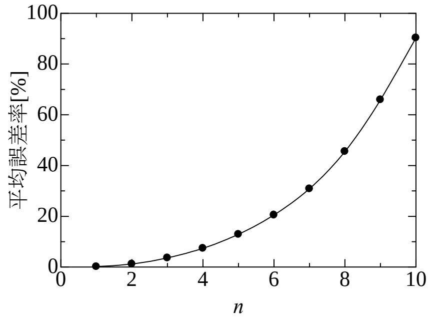

図 10　n に対する平均誤差率の変化

図から n の値を増加させると、平均誤差率は二次関数的に大きくなる。原因としては式(11)を用いて理論値を求める際に、n の値を増加させると光度の値の小数点以下の桁数が増えてしまい、少しの値のずれが誤差率に換算すると高くなってしまうためだと考えられる。しかし図 9 に示したように、理論値との平均誤差は小さく、n の値が 3 のとき 0.65、n の値が 10 のとき 0.90 となる。

また、表 1 に示すようにこの配光を用いたときの作業面での計算値と理論値の照度の平均誤差率は、0.57[%]以下であるため作業面に対してはそれほど影響がないと考えられる。

表 1　作業面での平均誤差率

nの値	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
誤差率[%]	0.54	0.57	0.39	0.43	0.37	0.36	0.33	0.26	0.32	0.32

式(14)を用いてモンテカルロ法で模擬した計算値と理論値を相対値で比較した。今回は a の値を 1 として b の値を変化させた。b の値を 1,10 にした時の配光を図 11 に示す。

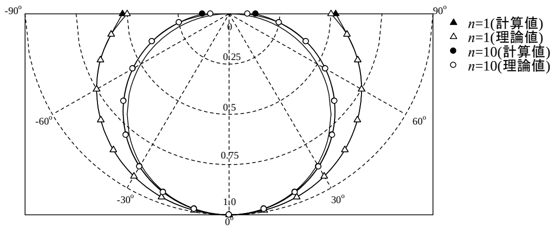

図 11　b=1, 10 のときの配光特性

b の値が 1 のとき理論値との平均誤差率は 0.48[%]となり、b の値が 10 のときは 4.51[%]となった。このように b の値を変化させると平均誤差率も変化するため、図 12 に b の値に対する平均誤差率特性の変化を示した。

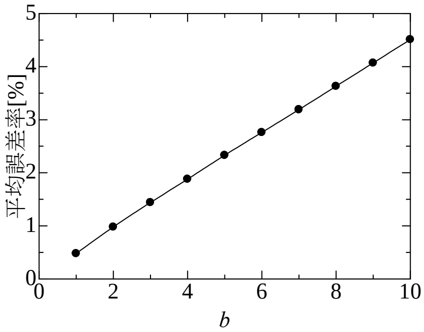

図 12　b に対する平均誤差率の変化

この図から平均誤差率は b の値が 1 のときの 0.48[%]から、b の値が 10 のときの 4.51[%]になるまで比例的に増加している。原因としては、鉛直角が 90 度のときの理論式(13)における光度の値は b が増加しても一定であるが、計算式(14)は b が増加しても一定ではなく計算値と理論値との誤差が大きくなることが影響しているためである。

しかし**表 2** に示すように、この配光を用いた場合の作業面での理論値との誤差率は、b が 0.67[%]以下であるため作業面に対してはそれほど影響がないと考えられる。

表 2　作業面での平均誤差率

b の値	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
誤差率[%]	0.67	0.64	0.71	0.59	0.62	0.64	0.54	0.60	0.59	0.59

4.2 照度均斉度[7]

作業面に対してムラがないことを確かめる一つの手段として照度均斉度が挙げられる。

照度均斉度とは作業面における照度分布のムラの程度を表すものである。照度均斉度は、最小照度 E_0、平均照度 E_a より、E_0/E_a で与えられる。照度均斉度の値が 1 に近いほど、作業面に対してムラがないことを表している。

表 3 に図 6 の条件で行った場合の均等拡散配光、半球拡散配光、全球拡散配光についての照度均斉度を示す。

表 3　配光の照度均斉度

配光	均等拡散	半球拡散	全球拡散
照度均斉度	0.75	0.82	0.80

工場などの高天井では照度均斉度が 0.5 以上が作業に適しているとされているので[8]、これらの 3 つの配光はこれを満たしている。

次に非均等拡散配光は式(11)の n の値によって照度均斉度が変化すると考えられるので、**図 13** に n の値をさせたときの照度均斉度を示す。

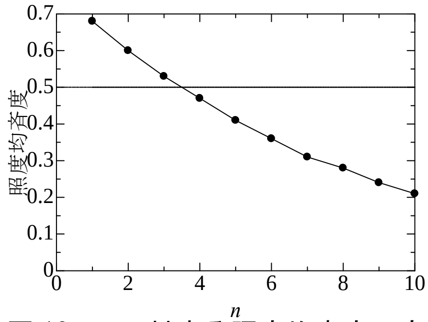

図 13　n に対する照度均斉度の変化

n の値を増やすと指向特性が狭くなるので、照度均斉度が減少する。n=3 以下の場合に照度均斉度の条件を満たしている。

図 14 に、非全球拡散配光の b の値を変化させたときの照度均斉度を示す。

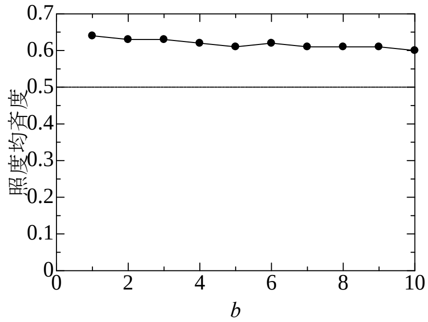

図 14　b に対する照度均斉度の変化

b の値を変化させても照度均斉度は 0.60～0.64 となり、0.5 より減少することはなかった。

5. まとめ

本報告では、モンテカルロ法を用いて模擬したさまざまな配光を理論値と比較し、どの配光が作業面に対してムラがないかを検討した。これらの配光をモンテカルロ法で模擬することは可能で、n,b の値を変えると配光を制御できることがわかった。

また、照度均斉度においては n の値が 3 以下のとき、0.5 以上を満たすことができ、その他の配光はこの条件を満たすことができた。

今後は、工場でよく使用されている HID ランプの配光を模擬し、検討を行う予定である。

参考文献

1) 大谷義彦ほか :「直方体模型室における影の特性において」, 電気設備学会誌 Vol.17-No.8 (1997) pp.799～802
2) 照明学会 :「照明ハンドブック」,オーム社 (2003) p.149
3) 照明学会 :「大学課程　照明工学(新版)」, オーム社 (1997) p.71
4) 大谷義彦ほか :「直方体模型室における影の特性において」, 電気設備学会誌 Vol.17-No.8 (1997)p.799
5) 照明学会 :「大学課程　照明工学(新版)」, オーム社 (1997) pp.3～6
6) 照明学会 :「大学課程　照明工学(新版)」, オーム社 (1997) pp.76～83
7) 照明学会 :「照明ハンドブック」,オーム社 (2003) p.78
8) 照明学会 :「大学課程　照明工学(新版)」, オーム社 (1997) p.204