タスク・アンビエント照明における影の中の照度変化に関する研究 —アンビエント光源の配置と光束の検討—

正会員 内 田 暁 (日本大学) 正会員 松 本 尚 樹 (株式会社明野設備研究所)
専門会員 大 谷 義 彦 (日本大学)

Variations in Illuminance Caused by Shadow under Task Ambient Lighting —Considering the Arrangement and Luminous Flux of Ambient Light—

Member Akira Uchida (Nihon University),
Member Naoki Matsumoto (Akeno Setsubi Engineering Inc.) and
Fellow Member Yoshihiko Ohtani (Nihon University)

ABSTRACT

We examined the characteristics of shadows created by task ambient lighting mounted on a ceiling on a work surface (a desk) for various combinations of lighting arrangements and luminous fluxes. Shadowing in work areas has become of greater concern with the decrease in illuminance on work surfaces due to the obstructions created by modern office designs (e.g., room partitions).

We found that when the arrangement and flux produce an illuminance uniformity ratio of greater than 0.7, the maximum shadow factor is less than 0.6, and the areas in shadow are less than 15% of the total area. Application of this principle will enable the design of more comfortable and efficient offices.

KEYWORDS : Task Ambient Lighting, Monte Carlo method, illuminance calculation, shadow

1. 緒言

作業空間の一つであるオフィスにおいて、作業目的や作業形態の変化に対応して、天井面に設置する光源の設置台数や配置、また光源からの光束を考慮する必要がある。一般的に、光源の設置台数や光束が増加することで作業面の平均照度も増加し、作業面上の照度分布についても室内空間に何も存在しない場合であれば、ある程度の予測が可能である。しかしながら、実際には作業者以外に、書棚、パーティション、VDTなどが存在する場合がほとんどであるため、作業面上の照度分布が複雑になるものと考えられる。また、光源の配置が変化した場合についても同様のことがいえる。

特に、オフィス照明方式の一つであるタスク・アンビエント照明方式では、作業面近傍にタスク光源やパーティションを設置する場合が多く、これらの存在も天井面に設置したアンビエント光源にとっては遮光物体となる。よって、快適な照明環境を設計する際に、このような遮光物体によって生じた作業面上の照度の低下や、影の状態をあらかじめ考慮することは重要な要素であると考えられる^{1)~3)}。

そこで本論では、タスク・アンビエント照明方式において、天井面に設置するアンビエント光源の設置台数と配置、ならびにア

ンビエント光源1台あたりの光束の変化に対する作業面上に生じる影の特性を明らかにすることを目的とした。

まず、タスク・アンビエント照明を施した室内空間において、人間の頭部を想定した遮光球を設置し、アンビエント光源の設置台数と配置、ならびに光束を変化させた場合の、作業面上に生じる影の中の照度変化を、モンテカルロ法を用いた照度計算^{4)~6)}による結果から検討を行った。さらにこの照度計算結果から、「影の深さ」⁷⁾を用いて作業面上に生じる影の状態について検討を行った。

2. 照度計算の概要

照度計算におけるモンテカルロ法^{4)~6)}では、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、光源からの放射および反射後における粒子の飛行方向や、室内面における粒子の反射、吸収の判別を乱数により決定させている。

2.1 放射方向の決定

図1は、室内の天井面に設置した点光源から放射された粒子の飛行軌跡の模擬を示したものである。光源からの放射と室内面における反射が均等拡散配光に従う場合、粒子の飛行する方向を示す鉛直角 θ と水平角 ϕ は、式(1)、式(2)のように一様乱数 ξ ($0 \leq \xi \leq 1$)との関係により表すことができる^{4)~6)}。

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{\xi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi = 2\pi\xi \quad \dots\dots\dots (2)$$

本論文の一部は平成12年度照明学会全国大会で松本尚樹が講演した。

図1 粒子の軌跡と面素の説明
Fig. 1 Explanation about the locus of the particle and the element.

なお本論では面光源を用いているので、点光源の集合として取り扱った。

2.2 室内面における反射および吸収の判別

室内面の反射率を ρ とした場合、一様乱数 ξ による粒子の反射および吸収の判別は式(3)で表すことができる。

$$\left. \begin{array}{l} \xi \leq \rho \text{ ならば反射} \\ \xi > \rho \text{ ならば吸収} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

2.3 照度値への変換

照度 E は、図1に示すような室内面を細分割して得た各面素に入射する粒子数に比例するものとして取り扱うことができ、式(4)で求められる。

$$E = \frac{\Phi}{N_0} \frac{N}{A} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

Φ : 光源の全光束, N : 各面素への入射粒子数,

N_0 : 光源の全放射粒子数, A : 一面素の面積

3. アンビエント光源の設定と作業面上の照度特性

3.1 模型室の設定

計算に使用した模型室の概要を図2に示す。模型室の床面左手前隅を原点 O とし、 XY 平面が床面と天井面に平行となるような XYZ 直角座標系を設定した。また、室内面は床面 S_1 、天井面 S_2 、壁面 $S_3 \sim S_6$ の計6面で構成されている。

図2 模型室の概要
Fig. 2 The schematic of the model room.

模型室の寸法は、間口、奥行き共に5.0m、高さ2.5mである。天井面には1.0m×1.0mの正方形アンビエント光源を、図2に示すように9個所設置できるようにした。実際の検討に用いたアンビエント光源の配置は図3に示す通りである。すなわち、実線で示した光源だけの組み合わせによる配置A~E、また破線で示した光源⑤を含めた組み合わせによる配置A'~E'の計10通りについてである。

この模型室内に、作業面である机上面を含んだ幅1.0m、奥行き0.8m、高さ0.75mのL形状机に、幅1.0m、高さ0.65mのパーティションを取り付け、さらに机上面から高さ0.65mの位置に、タスク光源である発光部が幅0.5m、奥行き0.1mの矩形光源を机上面と平行にパーティション上端に取り付けたものを、机上面の中心が模型室の床面中央部と一致するように設置した。

光源から放射される光束は、タスク光源を1000lm一定、アンビエント光源を1台について1000lm~5000lmの範囲で変化させた。その際、これらの関係をタスク光源に対するアンビエント光源の光束比で表すこととした。したがって、この値は1:1~1:5まで変化することになる。また、これらの光源は全て均等拡散配光とした。

各部の反射率は、床面を30%、天井面を70%、壁面を50%、L形状机とパーティションを30%とし、これらはすべて均等拡散反射特性を有するものとした。

作業面上に影を生じさせるための遮光物体は、作業者の頭部を想定し、反射率0%、半径0.1mの球体とした。なお、遮光球の中心座標は水平方向 $(X_g, Y_g) = (2.5, 2.5)$ 一定とし、高さ方向である Z_g は1.0m~1.3mと変化させた。

3.2 作業面上の照度分布および照度均斉度

計算結果の一例として、図4に机上面の等照度曲線、最小照度、平均照度を示す。なお、遮光球の高さは $Z_g = 1.1$ 一定である。(a)、(c)、(e)はアンビエント光源の配置がD、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比は(a)が1:1、(c)が1:3、(e)が1:5の場合であり、(b)、(d)、(f)はアンビエント光源の配置がD'、光束比は(b)が1:1、(d)が1:3、(f)が1:5の場合である。図4より、アンビエント光源の設置台数や配置、およびタスク光源に対するアンビエント光源の光束比が変化することで、机上面の照度分布は大きく変化することを示している。図5は、アンビエント光源の配置D、D'をパラメータとし、横軸にタスク光源に対するアンビエント光源の光束比、縦軸に図4から算出した机上面の最小照度、平均照度を取り、まとめたものである。タスク光源に対するアンビエ

図3 アンビエント光源の配置
Fig.3 Arrangement of the ambient lights.

ト光源の光束比が増加すると、最小照度、平均照度が共に比例的に増加している。また配置 D と、天井面中央部にアンビエント光源を1台多く設置する配置 D' を比較すると、最小照度で95 lx～418 lx、平均照度で87 lx～426 lxの差が生じている。これは、天井面中央部にアンビエント光源を設置することで、アンビエント光源直下に遮光球が存在することから、最小照度および平均照度の変化に大きく幅が生ずるものと考えられる。図4および図5より、アンビエント光源の配置ならびに光束比が変化することで机上面の照度特性に影響がみられることから、アンビエント光源の配置ならびに光束比の変化に対する机上面の照度むらの状態を、机上面の平均照度に対する最小照度の比で算出した照度均斉度を用いて検討を行うこととした。

遮光球の高さをパラメータとした場合の、アンビエント光源の配置の変化に対する照度均斉度特性を図6に示す。なお、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比は1:5一定としている。アンビエント光源の配置の変化に関わらず、遮光球の高さが高くなると照度均斉度が増加することがわかる。ここで照度均斉度が0.7以上⁸⁾となるのは、遮光球の高さに関わらずアンビエント光源を6台設置した配置 D, E である。遮光球の高さが $Z_g=1.1\text{m}$ 以上になると、天井面中央部にアンビエント光源を設置した配置 A'～E' も0.7以上となる。これらの結果から、照度均斉度を0.7以上とするためには、アンビエント光源を少なくとも3台以上設置する必要がある。

図6において $Z_g=1.1\text{m}$ 以上で照度均斉度が0.7以上を満たすアンビエント光源の配置の内 A', B', C', D, E をパラメータとした、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比を変化させた場合の照度均斉度特性を図7に示す。なお、遮光球の高さは $Z_g=1.1\text{m}$ 一定である。光束比が増加するに従って、アンビエント光源の配置に関わらず照度均斉度は増加し、照度均斉度が0.7以上を満たすためには、光束比が1:3～1:4以上を要するといえる。

4. アンビエント光源の設定と作業面上の影の特性

図4で示した等照度曲線から、遮光球によって生じた影の中の

図4 机上面の等照度曲線 (遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig.4 The iso-illuminance contours on the desk. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

図5 机上面の最小照度および平均照度 (遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig.5 Minimum and average illuminance on the desk. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

図6 アンビエント光源の配置に対する照度均斉度特性 (光束比=1:5)
Fig. 6 Characteristics of uniformity ratio of illuminance to arrangement of Ambient Lights. (Luminous flux ratio=1:5)

図7 光束比に対する照度均斉度特性 (遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig. 7 Characteristics of uniformity ratio of illuminance to luminous flux ratio. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

照度変化を知ることができるものの、机上面に生じている影の状態を把握することはできない。そこで、本章では「影の深さ」⁷⁾を用いて定量的に検討を進めることとした。「影の深さ」は、「影によって失われた照度と、影の無いときの照度の比」で定義される。すなわち影の深さを S とし、同じ点で影のないときの照度を E_0 、影の中の照度を E_s とすると、

$$S = \frac{E_0 - E_s}{E_0} \quad \text{.....(5)}$$

で与えられる⁷⁾。したがって本影の場合では $S=1.0$ 、半影で $1.0 > S > 0.0$ 、そして影の全く生じていない範囲で $S=0.0$ となる。

式(5)を用いて算出した一例として、机上面の等しい影の深さ曲線を図8に示す。なお、遮光球の高さは $Z_g=1.1\text{m}$ 一定である。(a), (c), (e)はアンビエント光源の配置がD、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比は(a)が1:1, (c)が1:3, (e)が1:5の場合であり、(b), (d), (f)はアンビエント光源の配置がD', 光束比は(b)が1:1, (d)が1:3, (f)が1:5の場合である。影の生じている状態は、図4に示した等照度曲線と比べ、図8の等しい影の深さ曲線の方がより明らかに表されている。図9は、アンビエント光源の配置D, D'をパラメータとし、横軸にタスク光源に対するアンビエント光源の光束比、縦軸に図8から算出した影の深さの最大値、机上面の面積に対する影の深さが0.1以上の⁹⁾面積により算出した影の範囲の割合をとり、まとめたものである。アンビエント光源の設置台数と配置、およびタスク光源に対するアンビエント光源の光束比が変化することで、影の深さの最大値や影の範囲の割合、

図8 机上面の等しい影の深さ曲線 (遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig. 8 The iso-shadow factor contours on the desk. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

図9 机上面の影の深さの最大値と影の範囲の割合 (遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig. 9 Maximum of shadow factor and rate of shadow area on the desk. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

すなわち机上面に生じる影の特性も変化することがわかる。そこで机上面に生じる影の特性として、影の深さの最大値ならびに影の範囲の割合に注目し、検討を行うこととした。

4.1 アンビエント光源の配置と影の特性

遮光球の高さをパラメータとした場合の、アンビエント光源の

配置に対する影の深さの最大値特性を図10に示す。なお、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比は1:5一定としている。アンビエント光源を2台設置した配置Aでは、影の深さの最大値は遮光球の高さ $Z_g=1.0\text{m}$ の場合で0.54、 $Z_g=1.3\text{m}$ の場合で0.08となり、0.46の差が生じる。これに対して、アンビエント光源を6台設置した配置Dでは、 $Z_g=1.0\text{m}$ の場合で0.28、 $Z_g=1.3\text{m}$ の場合で0.07となり、0.21の差となることから、設置台数を増加させることで影の深さの最大値を減少させることができる。しかし、天井面中央部にアンビエント光源を設置した場合では、天井面中央部にアンビエント光源を設置しない場合と比べ、影の深さの最大値は0.1増加する。これは、天井面中央部に設置したアンビエント光源の真下に遮光球が存在することで、机上面における遮光球直下の照度が著しく低下し、その結果影の深さの最大値が増加するためである。図10から、影の深さの最大値が0.4未満となるのは、配置D、D'、Eとなる。

遮光球の高さをパラメータとした場合の、アンビエント光源の配置に対する影の範囲の割合特性を図11に示す。なお、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比は1:5一定としている。天井面中央部にアンビエント光源を設置しない配置Bでは、影の範囲の割合は $Z_g=1.0\text{m}$ の場合で29.8%、 $Z_g=1.3\text{m}$ の場合で0.04%と変化の差は29.76%と広がるが、天井面中央部にアンビエント光源を設置した配置B'では、影の範囲の割合は $Z_g=1.0\text{m}$ の場合で24.2%、 $Z_g=1.3\text{m}$ の場合で5.5%と変化の差は18.7%と狭くなる。天井面中央部に設置するアンビエント光源の有無によるこの傾向は、すべてのアンビエント光源の配置についてみられる。これは、アンビエント光源と遮光球、また机上面との幾何学的関係から、天井面中央部に設置したアンビエント光源の直下に遮光球が存在することで、遮光球によって生じる影の大半が机上面中央部に集中し、影の生じる範囲が狭くなるためである。図11より、遮光球の高さが $Z_g=1.1\text{m}$ 以上で、影の範囲の割合が15%未満となるのは配置D、D'、Eとなる。

4.2 タスク光源に対するアンビエント光源の光束比と影の特性

3.2節で検討したアンビエント光源の配置A'、B'、C'、D、Eをパラメータとした場合の、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比に対する影の深さの最大値特性を図12に示す。なお、遮光球の高さは $Z_g=1.1\text{m}$ 一定である。天井面中央部にアンビエント光源を設置した配置A'、B'、C'では、光束比が1:3で影の深さ

図10 アンビエント光源の配置に対する影の深さの最大値特性(光束比=1:5)
Fig.10 Characteristics of maximum of shadow factor to arrangement of Ambient Lights. (Luminous flux ratio=1:5)

図11 アンビエント光源の配置に対する影の範囲の割合特性(光束比=1:5)
Fig.11 Characteristics of rate of shadow area to arrangement of Ambient Lights. (Luminous flux ratio=1:5)

図12 光束比に対する影の深さの最大値特性(遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig.12 Characteristics of maximum of shadow factor to luminous flux ratio. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

図13 光束比に対する影の範囲特性(遮光球の高さ: $Z_g=1.1\text{m}$)
Fig.13 Characteristics of rate of shadow area to luminous flux ratio. (The height of the shadow caster: $Z_g=1.1\text{m}$)

の最大値がそれぞれ0.29、0.25、0.26と最小になる。また、光束比が1:4~1:5の範囲で影の深さの最大値が増加するのは、式(6)における影のないときの照度と影の中の照度による差が増加するためである。天井面中央部にアンビエント光源を設置しない配置D、Eでは、光束比の増加に伴い影の深さの最大値は減少し、光束比が1:5でそれぞれ0.19、0.21と最小になる。

アンビエント光源の配置A'、B'、C'、D、Eをパラメータとした

場合、タスク光源とアンビエント光源の光束比に対する影の範囲の割合特性を図13に示す。なお、遮光球の高さは $Z_g=1.1\text{m}$ 一定である。天井面中央部にアンビエント光源を設置した配置 A', B', C' では、光束比の変化に関わらず影の範囲の割合は17.9%~23.6%の範囲で一定であるが、天井面中央部にアンビエント光源を設置しない配置 D, E では、光束比が増加すると、影の範囲の割合は減少する傾向がみられ、光束比が1:5でそれぞれ9.3%, 14.5%と最も狭くなる。

5. 結言

オフィス照明方式の一つであるタスク・アンビエント照明において、天井面に設置するアンビエント光源の配置、また作業面近傍に設置するタスク光源に対するアンビエント光源の光束比に着目し、モンテカルロ法を用いた照度計算から作業面の照度分布を求めるを試み、さらに「影の深さ」を用いて作業面上の影の特性を求めて検討を行ったところ、以下に示す結果が得られた。

- (1) 作業面上の最小照度と平均照度の比による照度均斉度が0.7以上となるのは、アンビエント光源を3台以上設置する配置 D, E, また A'~E' であり、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比は1:3~1:4以上を要する。
- (2) アンビエント光源の配置の変化について、天井面中央部にアンビエント光源を設置することで、作業面上における影の深さの最大値は増加、影の生じる範囲の割合は減少する傾向となる。
- (3) アンビエント光源の配置が D, E の場合、タスク光源に対するアンビエント光源の光束比が1:1~1:5と変化すると、影の深さの最大値は配置 D で0.42~0.18, 配置 E で0.45~0.21, また影の範囲の割合は配置 D で20.4%~9.2%, 配置 E で20.9%~14.4%と減少する。
- (4) 上述の(1)~(3)より、今回検討した条件において、照度均斉度が0.7以上、影の深さの最大値が0.6未満で、かつ影の範囲の割合が15%未満を満足するアンビエント光源の設定は、6台以上設置する配置 D, かつタスク光源に対するアンビエント光源の光束比は1:3以上が必要であることがわかった。

以上のように、アンビエント光源の配置と光束の変化に対する作業面上における影の特性を得ることができた。今後は、アンビエント光源の配光の変化、またタスク光源の位置や光束などについても検討を行い、より多くの基礎的なデータを揃えることにより、タスク・アンビエント照明の設計における最適条件を見出したいと考えている。

参考文献

- (1) P.Moon and D.E.Spencer: Lighting design, Addison-Wesley Press, pp.306~326 (1948).
- (2) I.McEwan and D.J.Carter: Some approaches to the treatment of obstruction in interior lighting design, Light.Res. Technol., 17-3, pp.107~115 (1985).
- (3) M.J.Lupton, A.S.M.Leung and D.J.Carter: Advances in lighting design methods for non-empty interiors, Light. Res.Technol., 28-1, pp.29~41 (1996).
- (4) 内田, 大谷: タスク・アンビエント照明における影の特性についての基礎的検討, 照学誌, 82-8A, pp.580~587(1998).
- (5) 内田, 大谷: タスク・アンビエント照明における影の中の照度変化に関する研究—アンビエント光源の位置および大きさの検討—, 照学誌, 83-11, pp.839~846 (1999).

(6) 大谷ほか: 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).

(7) K.Nordan: Shadow and diffusion in illuminating engineering, Sir Isaac Sons, Ltd., London, pp.3~5 (1948).

(8) 照明学会編: 屋内照明基準, p.43 (1999).

(9) P.Moon: Scientific basis of illuminating engineering, Dover Publications, Inc., New York, pp.507~514 (1936).

(受付日2001年6月20日/採録日2001年8月30日)

内田 暁 (正会員)

日本大学生産工学部電気電子工学科

松本 尚樹 (正会員)

株式会社明野設備研究所 設計部

大谷 義彦 (専門会員)

日本大学生産工学部電気電子工学科

昭和15年3月26日生まれ、昭和37年3月日本大学理工学部経営工学科電気工学専攻卒業。昭和37年4月同勤務。現在日本大学教授、工学博士。影の中の照度計算、画像処理装置による照明の評価などの研究に従事。平成9年照明学会賞受賞。電気学会、日本建築学会、電気設備学会会員、日本照明委員会副会長。