ベネチャンブラインドによる室内照度計算法

その 1. 拡散光を受ける場合

正会員 松 浦 邦 男*
正会員 金 會 瑞**
正会員 田 中 久 富***

1. 序

ルーバーなど日射遮へい装置が直射日光を受けた場合の室内照度の予測は、室内の光環境の評価、節減人工照明電力量および熱負荷の算定のために必要となってきた。本論文は日射遮へい装置として最も多く普及しているベネチャンブラインドの採光特性を理論的に明らかにし、室内照度計算法を提案することを目的とする。まず（その 1）では天空光や地面反射光など拡散光を受ける場合について述べ、ついで（その 2）で直射日光を受ける場合について述べる。

ここでいうベネチャンブラインドとはアルミニウム合金帯板を長手方向と垂直に円弧状に曲げ、アクリル系合成樹脂塗料焼付けとしてルーバー状にしたブラインドである。比較のための平板ルーバーは完全（均等）拡散反射性の平面帯板をルーバー状にしたものを考えている。また、ベネチャンブラインドまたは平板ルーバーを全体として扱う場合はこれをルーバーシステムと呼ぶ。

2. ベネチャンブラインドの形状と反射性状

2.1 解析条件

ベネチャンブラインドは平板ルーバーと異なりその羽根板断面は図—1.1 に示すように曲率半径 R の円弧である。断りのない限り二次元として取り扱い図—1.1 の紙面の垂直方向に無限に長く、その厚みは無視する。羽根板面の反射率は表裏とも一様で ρ とし、反射性状は 5 節を除き完全拡散反射面とする。窓外は輝度一様の天空と地面のみとし障害物は無い。

2.2 極座標の導入

図—1.1 に示すように上、下羽根板の断面を弧とする円の中心 O_s , O_R を極とし、極から各羽根板断面の中央点に向う直線を始線とする極座標を考え、上、下の極座標の偏角をそれぞれ η , ξ で表し、どちらも時計回りを正とする。

図—1.1 ベネチャンブラインド羽根板断面

3. 羽根板および羽根板間の一様天空による立体角投射率

3.1 平板ルーバー

ベネチャンブラインドと比較のために、二次元で均等拡散反射性の厚みを無視した羽根板を有する平板ルーバーについての立体角投射率および直接照度計算式を附録 (A-4)~(A-7) 式に示しておく。

3.2 ベネチャンブラインド（水平曲板ルーバー）

平板ルーバーと比較して、その立体角投射率とくに羽根板の間の一様天空によるものは、羽根板の円弧状の曲りによる影響が考えられるのでこれについて検討する。

(1) 羽根板に関する寸法 (図—1.1 参照) : 通常使用されるベネチャンブラインドの寸法より次の関係を用

* 京都大学 教授・工博

** 京都大学 大学院生・工修

*** (株)日建設計・工修

(昭和 60 年 5 月 13 日原稿受理)

いる（現在市販されている $b=25$, $p=21$, $R=28.5$ あるいは $b=35$, $p=29.5$, $R=40$ [各 mm] より求めた）。

$$p/b=0.84, R/b=1.14 \dots \dots \dots (1.1)$$

ここに、 p ：羽根板の間隔、 b ：羽根板の幅、 R ：羽根板断面の曲率半径。したがって、円弧の中心 O_R より円弧を挟む頂角の $1/2$ である w_a は次式により求められる。

$$b/2=R \cdot \sin w_a, w_a=26.01^\circ \approx 26^\circ \dots \dots \dots (1.2)$$

この w_a は羽根板の一端における円弧の接線と弦のなす角である。

(2) 羽根板と入射光との幾何学的関係：図—1.2 を参照して羽根板の弦の傾き β と入射光のプロフィール角（二次元断面上での水平からの仰角） φ との関係、さらに入射光が羽根板の曲りによって遮へいされる限界プロフィール角 φ_c との関係を求める。

i) $0^\circ < \beta < 90^\circ$, $0^\circ < \varphi < \alpha$ の場合（図—1.2(a) 参照）

$$\tan \alpha = (p/b) - \cos \beta / \sin \beta \\ = (0.84 - \cos \beta) / \sin \beta \dots \dots \dots (1.3)$$

$$\varphi_c = (\beta - 90^\circ) + 26^\circ = \beta - 64^\circ \dots \dots \dots (1.4)$$

$\varphi < \varphi_c$ のとき曲りによる遮へいが起る。

ii) $90^\circ < \beta < 180^\circ$, $(\beta - 90^\circ) < \varphi < \alpha$ の場合（図—1.2(b) 参照）

i) と同じ関係となる。

iii) $90^\circ < \beta < 180^\circ$, $0^\circ < \varphi < (\beta - 90^\circ)$ の場合（図—1.2(c) 参照）

$$\tan \alpha' = -(p/b) + \cos \beta / \sin \beta$$

$$= -(\cos \beta + 0.84) / \sin \beta \dots \dots \dots (1.6)$$

$$\varphi_c = (\beta - 90^\circ) - 26^\circ = \beta - 116^\circ \dots \dots \dots (1.7)$$

$\varphi > \varphi_c$ のとき曲りによる遮へいが起る。

ただし、 α' は図—1.2(c) の場合を負とする。 α' が正となると φ の範囲は $\alpha' < \varphi < (\beta - 90^\circ)$ となる。

以上の β と φ の関係を図示すれば図—1.3 のようになる。 $\varphi = \alpha$ の場合の (1.3) 式、 φ_c を示す (1.4) 式、 $\varphi = \beta - 90^\circ$ の関係、 $\varphi = \alpha'$ (+) の場合の (1.6) 式、 φ_c を示す (1.7) 式が示されている。

(3) 羽根板の曲りによる遮へいが起る範囲とそれによる直接透過率（羽根板に当らずその間を通り抜ける透過光の比率）[附録 (A-1)~(A-3) 式] の減少比 k ¹⁾：図—1.2(d) においてこの減少比を $k = \overline{DE} / \overline{CE}$ とする。

i) 図—1.3 に示す (1.4) 式と $\varphi = \beta - 90^\circ$ の直線との間では

$$k = \frac{R \{1 - \cos (90^\circ - w_a + \varphi - \beta)\}}{p \cdot \cos \varphi - b \cdot \cos (\beta - \varphi)} \dots \dots \dots (1.8)$$

ii) $\varphi = \beta - 90^\circ$ の場合は

$$k = \frac{R - \sqrt{R^2 - (b^2/4)}}{p \cdot \sin (180^\circ - \beta)} = \frac{0.1355}{\sin \beta} \dots \dots \dots (1.9)$$

ただし、 $\sin \beta < 0.1355$, $\beta \leq 172.1^\circ$ である。

iii) 図—1.3 に示す $\varphi = \beta - 90^\circ$ の直線と (1.7) 式との間では

$$k = \frac{R \{1 - \cos (90^\circ + w_a + \varphi - \beta)\}}{p \cdot \cos \varphi + b \cdot \cos (\beta - \varphi)} \dots \dots \dots (1.10)$$

これらの k の値を図—1.3 に等高線で示す。

図—1.2 羽根板と入射光との幾何学的関係

図—1.3 ルーバーシステムの直接透過率の減少比 k

$\beta < 90^\circ$ という通常の使い方では $\beta \approx 90^\circ$ (羽根板が水平に近い) かつ $\varphi \approx 0^\circ$ (入射光が水平に近く、室内作業面照度への影響が小さい) の場合以外は k は 0 または 0 に近く、附録に示した直接透過率への影響はほぼ無視できよう。

4. 完全拡散反射性の羽根板面照度および輝度とルーバーシステム透過率

4.1 相互反射積分方程式

図—1.1 に示す互に向き合った一組の羽根板面上の点 m, n の直接照度を $E_d(\xi), E_d(\eta)$, 全照度を $E(\xi), E(\eta)$ とすれば、相互反射積分方程式は上の羽根板の下向き面内での相互反射を無視すれば 2.2 で導入した極座標により次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} E(\xi) &= E_d(\xi) + \int_{-w_a}^{w_a} \rho \cdot E(\eta) \cdot e_o(\eta, \xi) R \cdot d\eta \\ E(\eta) &= E_d(\eta) + \int_{-w_a}^{w_a} \rho \cdot E(\xi) \cdot e_o(\xi, \eta) R \cdot d\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.11)$$

ここに、 $e_o(\eta, \xi), e_o(\xi, \eta)$ は二次元固有照度係数で次式で表される²⁾。

$$\begin{aligned} e_o(\eta, \xi) &= e_o(\xi, \eta) = \frac{\cos \delta_{mn} \cdot \cos \epsilon_{mn}}{2 l_{mn}} \\ &= \frac{[R \{ \cos(\eta - \xi) - 1 \} + p \cdot \sin(\xi + \beta)]}{2 [2 R^2 \{ 1 - \cos(\eta - \xi) \} + 2 R p \{ \sin(\beta + \eta) \}]} \\ &\quad \cdot \frac{[R \{ 1 - \cos(\eta - \xi) \} + R \cdot \sin(\eta + \beta)]}{-\sin(\xi + \beta) + p^2}^{1/3} \end{aligned} \dots\dots\dots (1.12)$$

図—1.5 上半光源（天空光）による羽根板面平均輝度比

図—1.4 羽根板への拡散光の入射

ここに、 $\delta_{mn}, \epsilon_{mn}$ および l_{mn} は図—1.1 に示す二次元断面内の角度および距離である。ただし、羽根板の傾斜角 β は $w_a \leq \beta \leq (\pi - w_a)$ の範囲で変化すると考えられるが、羽根板の曲りにより

$$\begin{aligned} \beta &< \left\{ w_a + \tan^{-1} \left(\frac{b^2}{\sqrt{4 R^2 p^2 - b^4}} \right) \right\} \\ \beta &> \left\{ \pi - w_a - \tan^{-1} \left(\frac{b^2}{\sqrt{4 R^2 p^2 - b^4}} \right) \right\} \end{aligned}$$

の範囲では羽根板上、下面間で相互見えない部分があり、この範囲では $e_o(\eta, \xi) = e_o(\xi, \eta) = 0$ とする。

4.2 光源条件

図—1.4 に示すように輝度一様な上半光源（天空光）（輝度 L_s [cd/m²]）および下半光源（地面反射光）（輝度 L_g [cd/m²]）よりルーバーシステムに拡散光が入射すると考える。

4.3 羽根板面照度および輝度

拡散光による羽根板面上の直接照度を求め、相互反射積分方程式 (1.11) の数値解法（羽根板面を適當数に分割し Simpson 則を用いて連立方程式として解く方法）により全照度分布を求めた³⁾。

これに ρ/π を乗ずれば輝度分布が得られる。さらにこれを平均し、光源輝度に対する比として表し、上半光源（天空光）に対する結果として羽根板の下向き面 L_{s1}/L_s , 上向き面 L_{s2}/L_s を図—1.5 に、下半光源（地面反射光）に対する結果とし、羽根板の下向き L_{g1}/L_g , 上向き面 L_{g2}/L_g を図—1.6 に、いずれも β と ρ を変えて示している。

4.4 ルーバーシステム透過率

図—1.4 に示すルーバーシステムの透過率は入射光束に対する透過光束の比であり、入射光が羽根板に当らずに直接透過する成分と、羽根板面で反射

して透過する間接透過成分に分けられ、後者は前項の羽根板面の輝度分布より求められる。上半光源のみの条件での室内側の下向きおよび上向き透過率 τ_{ds1} および τ_{ds2} を図-1.7 に示す。また下半光源のみの条件での室内側の下向きおよび上向き透過率 τ_{dg1} および τ_{dg2} を図-1.8 に示している。これらの透過率は (1.14) 式, (1.15) 式に用いるために求めているもので、いずれも β と ρ を変えて示している。

なお、この計算では羽根板の曲りによる減少比 k は考慮せずに求めている。

4.5 平板ルーバーとの比較

図-1.5~1.8 には図-1.1 と同じ寸法で弦が羽根板となった平板ルーバーについて同じ光源条件の数値計算結果⁴⁾が破線および点線で示されている。図-1.8 の下半光源の場合の下向き透過率 τ_{dg1} を除いて一般に平板ルーバーの方が大きい値となっている。ベネチアンブラインドの採光効率が少し悪いことを意味するものである。

5. 室内作業面照度の計算式

5.1 直接照度

(1) $0^\circ < \beta < 90^\circ$ の場合：図-1.9(a) に示す $\varphi < |26^\circ - (90^\circ - \beta)|$ では平板ルーバーと異なり受照点 p から羽根板上向き面の一部が見えるが、その部分の立体角は下向き面に比べて小さい。また羽根板の曲りによる透過率の減少は図-1.3 に示すようにわずかである。したがってこの場合は平板ルーバーの式 (A-8) を用いて差支えない。なお、羽根板下向き面輝度 L_1 としては上半光源天空光による図-1.5 の L_{s1}/L_s と下半光源（地面反射光）による図-1.6 の L_{g1}/L_g に両光源の輝度 L_s , L_g をそれぞれ乗じその和をとる。

(2) $90^\circ < \beta < 180^\circ$ の場合：図-1.9(b) に示す $(\beta - 90^\circ) < \varphi < (\beta - 90^\circ) + 26^\circ$ では平板ルーバーとは異なり羽根板上向き面が見えるが、この範囲は羽根板の立体角が小さいのであまり問題にならない。羽根板の曲りによる透過率の減少比 k は β が約 120° では図-1.3 より平均約 0.1 でこれも問題ない。したがって β があまり大きくならない限り、平板ルーバーの式 (A-9) を用いて差支えない。羽根板面輝度は図-1.5, 1.6 より求める。

5.2 間接照度

間接照度 E_r [lx] は次の作業面切断公式⁵⁾を用いる。

$$E_r = \tau_g \frac{(F_1 \rho_1 + F_2) \rho_2}{A(1 - \rho_1 \rho_2)} \dots (1.13)$$

ここに、 τ_g は窓ガラスの拡散透過率、 A [m²] は作業面

図-1.6 下半光源（地面反射光）による羽根板面平均輝度比

図-1.7 上半光源（天空光）によるルーバーシステム透過率

面積、 ρ_1 , ρ_2 はそれぞれ作業面上向き、下向き等価反射率、 F_1 , F_2 は作業面よりそれぞれ上部、下部に入射する光束 [lm] であり

$$F_1 = E_u(D_{w1} \tau_{ds1} + D_{w2} \tau_{dg1}) A_0 / 100 \dots (1.14)$$

図—1.8 下半光源（地面反射光）によるルーバーシステム透過率

図—1.9 ベネチャンブラインドから受照点への入射角

$$F_2 = E_u(D_{w1}\tau_{ds2} + D_{w2}\tau_{dg2})A_0/100 \dots \dots \dots (1.15)$$

ここに、 E_u [lx] は全天空照度 ($E_u = \pi L_s$)、 D_{w1} 、 D_{w2} [%] はルーバーシステム外側鉛直面のそれぞれ上半、下半光源による昼光率、 τ_{ds1} 、 τ_{ds2} は図—1.7、 τ_{dg1} 、 τ_{dg2} は図—1.8 より得られ、 A_0 [m²] は窓の面積である。

6. むすび

二次元のベネチャンブラインドが外部光源から拡散光を受ける場合の採光特性を理論的に明らかにし、室内作業面照度の計算法を与えた。これにより外部の窓面より上半の一樣輝度天空と下半の一樣輝度地面が任意の輝度を持つ場合の作業面照度を計算することができる。羽根板の傾き β が 90° 以下という通常の使い方では、同じ寸法で弦が羽根板になった平板ルーバーによる照度計算法を用いてもほぼ差支えないことが明らかになった。またベネチャンブラインドの羽根板は正反射成分を持っているが、入射光が拡散性の場合は反射性が拡散するので羽根板を拡散反射性に見なしても大きな誤差は生じない。

なお、窓が有限幅の場合は近似的には附録の (A-10) 式を用いるが、その精度等については別の機会に述べたい。

引用文献

- 1) 松浦邦男, 金 會瑞: 日本建築学会近畿支部研究報告集, No. 25<計画系>p. 131, 昭和 60 年 5 月
- 2) 松浦邦男: 日本建築学会論文報告集, 第 67 号, p. 75~82, 昭和 36 年 2 月
- 3) 松浦邦男, 田中久富: 日本建築学会近畿支部研究報告集, No. 21<計画系>p. 45, 昭和 56 年 6 月
- 4) K. MATSUURA: Short Paper for 17th CIE Session (E-3.2) Sep. 14, 1971
- 5) K. MATSUURA & H. TANAKA: J. Light & Vis Environ Vol. 3, No. 2, p. 24 [Appendix] 1979

附録. 二次元平板ルーバー窓による直接照度計算式

羽根板の傾きのない場合 (図—A.1 で $\beta = 90^\circ$) については小木曾氏が導き^{A-1)}、これを松浦が任意の傾きの場合について拡張し^{A-2)}、さらに一般化してここに示した。

1. 平板ルーバーシステムの透過率 (下向き光のみ、 $\varphi > 0$)

プロファイル角 φ が正の下向き光のルーバー羽根板間を通り抜ける直接透過率は図—A.1 の三つの場合について次式で表される (w , p , α , β , φ は図—A.1 に示す)。

- a) $0^\circ < \beta < 90^\circ$, $0^\circ < \varphi < \alpha$ の場合 (図の (a))

$$t_a(\varphi) = \frac{w(\tan \alpha - \tan \varphi)}{p} = \frac{\tan \alpha - \tan \varphi}{\tan \alpha + \cot \beta} \dots \dots \dots (A-1)$$

ここに、 $w = p/(\tan \alpha + \cot \beta)$

- b) $90^\circ < \beta < 180^\circ$, $|\beta - 90^\circ| < \varphi < \alpha$ の場合 (図の (b))

$$t_b(\varphi) = \frac{p - w(\tan \varphi + \cot \beta)}{p} = \frac{\tan \alpha - \tan \varphi}{\tan \alpha + \cot \beta} = t_a(\varphi) \dots \dots \dots (A-2)$$

- c) $90^\circ < \beta < 180^\circ$, $0^\circ < \varphi < |\beta - 90^\circ|$ の場合 (図の (c))

$$t_c(\varphi) = \frac{p + w(\tan \varphi + \cot \beta)}{p} = \frac{\tan \alpha + 2 \cot \beta + \tan \varphi}{\tan \alpha + \cot \beta} \dots \dots \dots (A-3)$$

2. 羽根板の間の一樣天空による立体角投射率

作業面上 p 点の立体角投射率は下式で求められる。

i) $0 < \beta < 90^\circ$ の場合 (図-A.2 参照)

$$c_{sa} = \frac{1}{2} \int_0^{\alpha} t_a(\varphi) \sin \varphi d\varphi$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{\tan \alpha + \cot \beta} \left\{ (1 - \cos \overline{\alpha, \theta}) \tan \alpha + \sin \overline{\alpha, \theta} \right.$$

$$\left. - \log_e \left| \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\overline{\alpha, \theta}}{2} \right) \right| \right\} \dots \dots \dots (A-4)$$

ただし, $\overline{\alpha, \theta}$ は α, θ の小さい方の値を意味する。

ii) $90^\circ > \beta > 180^\circ$ の場合 (図-A.3 参照)

$$c_{sbc} = c_{sb} + c_{sc} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tan \alpha + \cot \beta} \left\{ (1 - \cos \overline{\alpha, \theta}) \tan \alpha \right.$$

$$+ \sin \overline{\alpha, \theta} + 2 \cot \beta (1 - \sin \beta) \left.
$$\left. - \log_e \left| \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\overline{\alpha, \theta}}{2} \right) \right| \right\} \dots \dots \dots (A-5)$$$$

$$c_{sb} = \frac{1}{2} \int_{\beta-\frac{\pi}{2}}^{\alpha} t_b(\varphi_1) \sin \varphi_1 d\varphi_1$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{\tan \alpha + \cot \beta} \left\{ (\sin \beta - \cos \overline{\alpha, \theta}) \tan \alpha + \cos \beta \right.$$

$$+ \sin \overline{\alpha, \theta} - \log_e \left| \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\overline{\alpha, \theta}}{2} \right) / \tan \frac{\beta}{2} \right| \left. \right\}$$

$$\dots \dots \dots (A-6)$$

$$c_{sc} = \frac{1}{2} \int_0^{\beta-\frac{\pi}{2}} t_c(\varphi_2) \sin \varphi_2 d\varphi_2$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{\tan \alpha + \cot \beta} \left\{ (\tan \alpha + 2 \cot \beta) (1 - \sin \beta) \right.$$

図-A.1 ルーバーシステムの直接透過率

附録引用文献

- A-1) 小木曾定彰：建築学大系 8 (Ⅱ. 照明学) p. 203, 彰国社, 1955 年 7 月
 A-2) 松浦邦男：建築照明, p. 127, 共立出版, 1971 年 3 月
 A-3) 同上, p. 128

図-A.2 平板ルーバーシステム断面

図-A.3 平板ルーバーシステム断面

図-A.4

SYNOPSIS

UDC : 628. 9. 02 : 69. 028. 3

CALCULATION METHOD OF INTERIOR ILLUMINANCE FROM VENETIAN BLIND SYSTEM Part 1 Case of diffuse-lit blind system

by Dr. KUNIO MATSUURA, Professor, Kyoto Univ., KIM
HWAY SUH, Graduate Student, Kyoto Univ. and HISA-
TOMI TANAKA, Nikken Sekkei Ltd., Members of A. I. J.

The purpose of this paper is to give a general calculation method of illuminance on the working plane in interior from a two-dimensional window with a Venetian blind system, and to get the available data for the average luminances of slats and the transmittances of blind system. In this paper, Part 1, it is assumed that the slats are of negligible thickness, uniformly diffusing surfaces and part of circle on the two-dimensional cross section.

In Part 1 the blind system is illuminated by diffuse light from the sky and ground with uniform luminance.

Reduction ratio of direct transmittance of blind system due to the slatcurvature is investigated with relation to the slat angle of inclination and the incident angle of daylight to blind system.

Next, integral equations for interreflection in unit-cell of curved slats are developed to obtain illuminance distributions on the slats, and the numerical solution of these equations gives the average luminances of slat surfaces and the transmittances of downward and upward fluxes to interior. These results are examined as compared with values on the same louver system except that slats are flat.

It is concluded that the formula for louver system with flat slats can be available to calculation of direct illuminance on the working plane from Venetian blind in normal case of the slat angle of inclination and the formula of split-flux at the working plane by MATSUURA is useful in practice to calculate the indirect illuminance using data of the above-mentioned transmittances of blind system.