有彩色ルーバ照明の理論解析(Ⅰ) ——一升の正方形有彩色ルーバの光学的特性について——

専門会員 西村 政信 (大同工業大学) 准員 和田 昌也 (大同工業大学)
専門会員 饗庭 貢 (金沢工業大学) 名誉会員 佐土根 範次 (トーエネック技術短期大学校)

Theoretical Analysis of the Lighting Calculation of Chromatic Color Louvered Ceiling Systems (Part I)

—Optical Characteristics of One Duct Square Cell of Chromatic Color Louvers—

Fellow Member Masanobu Nishimura, Semi-Member Masaya Wada (Daido Institute of Technology)

Fellow Member Susumu Aiba (Kanazawa Institute of Technology)

Honorary Member Hanji Satone (Toenec Technical College)

ABSTRACT

In previous papers the authors described a lighting calculation procedure for a room with an achromatic color louvered ceiling. However, we cannot use this procedure to calculate the luminous colors incident on horizontal illuminated surfaces and the true colors of walls of a room.

The authors thus started to study the lighting calculation procedure of chromatic color louvered ceiling systems in order to calculate not only illuminance and luminance but also luminous colors incident on horizontal illuminated surfaces and true colors of walls of a room.

The optical characteristics of chromatic color louvers of one duct square cell, namely, spectral efficiency, spectral changing rate (apparent spectral transmittance), and spectral radiant exitance and chromaticity of light on the undersurface of a louver are important factors for the lighting calculation procedure of chromatic color louvered ceiling systems.

In this paper, theoretical methods of those characteristics are proposed and their calculated values are given. The calculated values obtained by the theoretical analysis methods on the efficiency and the flux changing rate (apparent transmittance) of louvers and the chromaticity of light on the under surface of a louver are compared with the measured values. It is made clear that this theoretical method is effective.

KEYWORDS : chromatic color louver, louvered ceiling system, lighting calculation

1. まえがき

近年、広間のようなかなり広い床面積の部屋を多目的に使用する建築空間(多目的ホールなど)が増えてきている。このような部屋は、天井全面にルーバ照明を施したルーバ天井とし、やわらかい照明光を得る調光や色彩を変化させる色調光を自動制御する方法が採用されている。少なくとも、被照面のインテリアデザインの色調と反射率が関与し、音響に対する雑音のない静かな調光の場合に、簡便に(手軽に)カラールーバを使用することで、多目的ホールなどに、やわらかな色彩変化を演出する光を造製することができれば手法として面白いと考えられる。

また、快適視環境の実現のためには、被照面照度、輝度という明るさの設計だけでは不十分であり、室内の色彩環境も考慮する必要がある。照明手法の一つにルーバを天井全面に取り付けて光源のグレアを防止するルーバ天井照明方式がある。筆者らは、無彩色に対するルーバ照明の照明設計法¹⁾についてはすでに報告し

たが、この方法では室内の水平被照面に入射する光の色や室内壁面の色を知ることができない。

そこで筆者らは、有彩色のルーバを用いて、被照面照度、輝度だけではなく、室内の水平被照面に入射する光色や室内壁面等の色をも予測可能な有彩色ルーバ照明の計算法の研究に着手した。一方、有彩色ルーバを用いることで、光源で調整できない色彩の調光も有彩色ルーバを用いることによって、可能とすることも考慮する。

本論文では、無彩色ルーバを有彩色ルーバとしたときの実用的に十分な精度を有する有彩色ルーバ照明の計算法を得るために、手はじめに一升の正方形有彩色ルーバの光学的特性について系統的に検討を行った結果を報告する。

すなわち、有彩色ルーバ照明の計算法の計算要素として重要な一升の正方形有彩色ルーバの光学的特性(分光ルーバ効率、ルーバの分光変化率、ルーバ下面の分光放射発散度、ルーバ下面の光の色度)の理論解析法を提案すると共に、それらの計算例を示す。さらに、ルーバ効率、ルーバの光束変化率およびルーバ下面の光の色度については、一升の正方形有彩色ルーバの光学的特性解析法

本論文の一部は、平成5年及び平成6年度電気関係学会東海支部連合大会で発表した。

による計算値と測定値の比較を行い、理論解析法が妥当であることが確認できたので報告する。

2. 一升の正方形有彩色ルーバの光学的特性の計算方法

一升の正方形有彩色ルーバの光学的特性の計算方法は、筆者らがすでに発表した無彩色の正方形ルーバの特性計算方法²⁾³⁾⁴⁾を拡張したものである。計算方法は、相互反射系の近似解法に基づき、放射照度に対する連立方程式を解いて、ルーバ各面の最終放射照度を求めたのち、分光ルーバ効率、ルーバの分光変化率、ルーバ下面の最終照度、ルーバ下面の光の色度を得る方法をとった。

2.1 分光ルーバ効率とルーバ効率の計算方法

一般にルーバとして用いられている構造は図1に示す正方形ルーバである。ルーバ内壁が均等拡散面とすれば、正方形ルーバの分光ルーバ効率は(1)式の分光放射照度に対する相互反射方程式を解くことにより得られる。

$$\begin{pmatrix} 1-R_{2\lambda}F_{11} & -\rho_{\ell\lambda}F_{12} & -R_{3\lambda}F_{13} \\ -R_{2\lambda}F_{21} & 1-\rho_{\ell\lambda}F_{22} & -R_{3\lambda}F_{23} \\ -R_{2\lambda}F_{31} & -\rho_{\ell\lambda}F_{32} & 1-R_{3\lambda}F_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1\lambda} \\ E_{2\lambda} \\ E_{3\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{01\lambda} \\ E_{02\lambda} \\ E_{03\lambda} \end{pmatrix} \quad \text{.....(1)}$$

ここで、

- $R_{2\lambda}$: ルーバ上面の下向き分光等価反射率
- $R_{3\lambda}$: ルーバ下面の上向き分光等価反射率
- $\rho_{\ell\lambda}$: ルーバ内壁面の分光反射率
- F_{ij} : 固有入射光束係数
- $E_{1\lambda}$: ルーバ上面の分光放射照度 [$W/m^2 \cdot nm$]
- $E_{2\lambda}$: ルーバ内壁面の分光放射照度 [$W/m^2 \cdot nm$]
- $E_{3\lambda}$: ルーバ下面の分光放射照度 [$W/m^2 \cdot nm$]
- $E_{01\lambda}$: ルーバ上面の分光直達放射照度 [$W/m^2 \cdot nm$]
- $E_{02\lambda}$: ルーバ内壁面の分光直達放射照度 [$W/m^2 \cdot nm$]
- $E_{03\lambda}$: ルーバ下面の分光直達放射照度 [$W/m^2 \cdot nm$]

図1で示すような1辺が a [m]、高さが c [m]の正方形ルーバで、ルーバ上面に入射する光が均等拡散光源であり、初期分光放射発散度が $M_{01\lambda}$ なる条件とすれば、ルーバの室指数 $k_\ell = a/2c$ 、ルーバ上面より下面への固有入射光束係数 f は(2)式となる。

図1 一升の正方形ルーバの構造
Fig. 1 Structure of one duct square louver.

$$f = \frac{1}{2\pi k_\ell^2} \left\{ \log_e \frac{1+4k_\ell^2}{\sqrt{1+8k_\ell^2}} - 4k_\ell \tan^{-1} 2k_\ell + 4k_\ell \sqrt{1+4k_\ell^2} \tan^{-1} \frac{2k_\ell}{1+4k_\ell^2} \right\} \quad \text{.....(2)5)}$$

これらを用いて、(1)式は(3)式ようになる。

$$\begin{pmatrix} 1 & -\rho_{\ell\lambda}(1-f) & -R_{3\lambda}f \\ -R_{2\lambda}\frac{k_\ell}{2}(1-f) & 1-\rho_{\ell\lambda}\{1-k_\ell(1-f)\} & -R_{3\lambda}\frac{k_\ell}{2}(1-f) \\ -R_{2\lambda}f & -\rho_{\ell\lambda}(1-f) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1\lambda} \\ E_{2\lambda} \\ E_{3\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k_\ell}{2}(1-f)M_{01\lambda} \\ fM_{01\lambda} \end{pmatrix} \quad \text{.....(3)}$$

また、分光ルーバ効率 η_λ は(4)式で定義される。

$$\eta_\lambda = E_{3\lambda} / (M_{01\lambda} + R_{2\lambda}E_{1\lambda}) \quad \text{.....(4)}$$

(3)式の $E_{1\lambda}$ と $E_{3\lambda}$ を求め(4)式に代入すると

$$\eta_\lambda = \frac{[1 - \{1 - (1-f)k_\ell\}\rho_{\ell\lambda}]f + 0.5k_\ell(1-f)^2\rho_{\ell\lambda}}{1 - \{1 - (1-f)k_\ell\}\rho_{\ell\lambda} - 0.5k_\ell(1-f)^2\rho_{\ell\lambda}R_{3\lambda}} \quad \text{.....(5)}$$

となる。

(5)式より分光ルーバ効率は、ルーバ上面の下向き分光等価反射率 $R_{2\lambda}$ と光源の分光特性に依存しない量であることがわかる。

一方、ルーバ効率 η は(5)式の添字 λ を取り去った式で表される²⁾。ルーバ効率 η は(5)式の分光ルーバ効率を求める式において、ルーバ内壁面の分光反射率 $\rho_{\ell\lambda}$ をルーバ内壁面の平均反射率 ρ_ℓ に、ルーバ下面の上向き分光等価反射率 $R_{3\lambda}$ をルーバ下面の上向き等価反射率 R_3 に置き換えることによって得られる。

ルーバ効率はルーバ上面の下向き等価反射率 R_2 には依存しないが、ルーバ内壁の平均反射率 ρ_ℓ とルーバ下面の上向き等価反射率 R_3 が光源の分光特性によって変化するので、光源の種類に依存する量である。この詳細については次の報告に譲る。

2.2 ルーバの分光変化率とルーバの光束変化率の計算方法

ルーバ天井照明ではなく、ルーバ方式照明器具として、ルーバを用いる場合は(6)式で定義されるルーバの分光変化率 C_λ が必要である。

$$C_\lambda = E_{3\lambda} / M_{01\lambda} \quad \text{.....(6)}$$

(3)式から得られるルーバ下面の最終分光放射照度 $E_{3\lambda}$ を(6)式に代入すると、(7)式が得られる。

$$C_\lambda = \frac{(1-T\rho_{\ell\lambda})f + P\rho_{\ell\lambda}}{(1-T\rho_{\ell\lambda})(1-f^2R_{2\lambda}R_{3\lambda}) - P\rho_{\ell\lambda}(2fR_{2\lambda}R_{3\lambda} + R_{2\lambda} + R_{3\lambda})} \quad \text{.....(7)}$$

ここで、 $T = 1 - (1-f)k_\ell$ 、 $P = 0.5k_\ell(1-f)^2$

(7)式より、ルーバの分光変化率 C_λ は光源の種類に依存しないことがわかる。

ルーバの光束変化率 C は(7)式の添字 λ を取り去った式で表される。すなわち、ルーバの光束変化率 C は(7)式のルーバの分光変化率 C_λ を求める式において、ルーバ内壁面の分光反射率 $\rho_{\ell\lambda}$ をルーバ内壁面の平均反射率 ρ_ℓ に、ルーバ上面の下向き分光等価反射率 $R_{2\lambda}$ をルーバ上面の下向き等価反射率 R_2 に、ルーバ下面の上向き分光等価反射率 $R_{3\lambda}$ をルーバ下面の上向き等価反射率 R_3 に置き換えることによって得られる。この光束変化率もルーバ効率と同様 ρ_ℓ 、 R_2 、 R_3 が光源の分光特性によって変化するので光源の種類に依存する量である。

2.3 ルーバ下面の最終分光放射照度の計算方法

(3)式を解くことによりルーバ下面の最終分光放射照度 $E_{3\lambda}$ を求めることができる。 $E_{3\lambda}$ は光源の種類、ルーバ形状、 $\rho_{\ell\lambda}$ 、 $R_{2\lambda}$ 、 $R_{3\lambda}$ 、

に依存する量である。このルーバ下面の最終分光放射照度はルーバ下面の最終分光放射発散度 $M_{3\lambda}$ に等しい。また、ルーバ下面の最終照度 E_3 とルーバ下面の光の色度は(8)と(9)式により計算する。

$$\left. \begin{aligned} X &= 683 \int_{380}^{780} E_{3\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \\ E_3 = Y &= 683 \int_{380}^{780} E_{3\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \\ Z &= 683 \int_{380}^{780} E_{3\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (9)$$

3. 有彩色ルーバの光学的特性の理論解析法と計算例

実際のルーバの光学的特性の計算に際し、計算精度を良くするため2章の計算方法に改良を加えた計算方法を用いたので、この計算方法について述べる。

また、実際にルーバの光学的特性（分光ルーバ効率、ルーバの分光変化率、ルーバ下面の分光放射発散度、ルーバ下面の光の色度）を計算し、それぞれの光学的特性について検討を行う。

3.1 ルーバ内壁を3分割した有彩色ルーバの光学的特性の計算方法

(1)式で示した相互反射方程式は各面の分光放射照度が均一であるという仮定で成り立つものである。ルーバの室指数 k_t が小さくなると、ルーバ内壁の分光放射照度の不均一性が増す⁶⁾。そこで、ルーバ内壁の分光放射照度が均一であるという仮定条件に近づけるため、図2に示すようにルーバの内壁を上下方向に3分割すると、相互反射系の近似解法に基づく分光放射照度に対する相互反射方程式は(10)式となる。

$$\begin{pmatrix} 1-R_{2\lambda}F_{11} & -\rho_{t\lambda}F_{12} & -\rho_{t\lambda}F_{13} & -\rho_{t\lambda}F_{14} & -R_{3\lambda}F_{15} \\ -R_{2\lambda}F_{21} & 1-\rho_{t\lambda}F_{22} & -\rho_{t\lambda}F_{23} & -\rho_{t\lambda}F_{24} & -R_{3\lambda}F_{25} \\ -R_{2\lambda}F_{31} & -\rho_{t\lambda}F_{32} & 1-\rho_{t\lambda}F_{33} & -\rho_{t\lambda}F_{34} & -R_{3\lambda}F_{35} \\ -R_{2\lambda}F_{41} & -\rho_{t\lambda}F_{42} & -\rho_{t\lambda}F_{43} & 1-\rho_{t\lambda}F_{44} & -R_{3\lambda}F_{45} \\ -R_{2\lambda}F_{51} & -\rho_{t\lambda}F_{52} & -\rho_{t\lambda}F_{53} & -\rho_{t\lambda}F_{54} & 1-R_{3\lambda}F_{55} \end{pmatrix}$$

図2 ルーバ内壁の3分割
Fig.2 A louver divided into three parts horizontally.

$$\begin{pmatrix} E_{1\lambda} \\ E_{2\lambda} \\ E_{3\lambda} \\ E_{4\lambda} \\ E_{5\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{01\lambda} \\ E_{02\lambda} \\ E_{03\lambda} \\ E_{04\lambda} \\ E_{05\lambda} \end{pmatrix} \cdots \cdots \cdots (10)$$

ただし、
 $E_{1\lambda}$: ルーバ上面の分光放射照度 [W/m²・nm]
 $E_{2\lambda}, E_{3\lambda}, E_{4\lambda}$: 3分割した壁面の分光放射照度 [W/m²・nm]
 $E_{5\lambda}$: ルーバ下面の分光放射照度 [W/m²・nm]
 $E_{01\lambda}$: ルーバ上面の分光直達放射照度 [W/m²・nm]
 $E_{02\lambda}, E_{03\lambda}, E_{04\lambda}$: 3分割した壁面の分光直達放射照度 [W/m²・nm]
 $E_{05\lambda}$: ルーバ下面の分光直達放射照度 [W/m²・nm]
 F_{ij} : 固有入射光束係数

以下に示す計算例は、初期条件としてルーバ上面の初期分光放射発散度を $M_{01\lambda}$ とし、固有入射光束係数の定理および基本公式⁵⁾を用いて、 F_{ij} および、 $E_{01\lambda}, E_{02\lambda}, E_{03\lambda}, E_{04\lambda}, E_{05\lambda}$ を求めて、(10)式に代入して、行列式を解いて得られたルーバ各面の分光放射照度 $E_{1\lambda}, E_{2\lambda}, E_{3\lambda}, E_{4\lambda}, E_{5\lambda}$ を用いた。

3.2 有彩色ルーバの光学的特性の計算例
3.2.1 一般の色紙をルーバ内壁に使用した場合の計算例⁷⁾

- (1) 計算条件
 - ① ルーバ上面の光源は、一般にルーバ照明に用いられる光源が白色蛍光ランプなので、白色蛍光ランプの分光特性を持つ均等拡散光源を用いる。光源の初期分光放射発散度 $M_{01\lambda}$ を図3に示す。
 - ② ルーバ上面の下向き分光等価反射率 $R_{2\lambda}$ は図4に示す。
 - ③ ルーバ下面の上向き分光等価反射率 $R_{3\lambda}$ は簡単のため0とする。
 - ④ ルーバの条件としては、下記のように合計9種類である。
 - a) ルーバ形状は正方形で一边の長さ $a=200$ [mm] とし、高さ c が $a/2, a, 2a$ の3種類とする。すなわち遮光角 ϕ は $\phi=\tan^{-1}(c/a)$ で定義されるので $\phi=27^\circ, 45^\circ, 63^\circ$ の3種類である。
 - b) ルーバ内壁の色には四国製紙のカラーケント青(No.5)、緑(No.238)、赤(No.2)を用い、3種類とする。青色の分光反射率を図3に示す。通常、表1のそれぞれの値は標準光源(C光源またはD₆₅光源)と各々の色紙の分光反射率

図3 青色ルーバのルーバ下面の分光放射照度
Fig.3 Spectral radiant exitance on the undersurface of blue louvers.

図4 ルーバ上面の下向き分光等価反射率

Fig. 4 Spectral equivalent reflectance in a lower direction on the uppersurface of a louver.

表1 色紙のマンスセル値, 視感反射率, 色度

Table 1 Munsell value, hue, and chroma; reflectance; chromaticity coordinates (of colored paper).

色紙の色	色相	明度	彩度	視感反射率 (%)	色度	
					x	y
赤	0.4 Y R	5.2	10.8	21.8	0.518	0.366
青	3.4 B	4.6	3.5	16.0	0.251	0.293
緑	4.7 G Y	6.7	9.4	39.3	0.388	0.504

から計算するが, 2.1項, 2.2項で述べたように光源の種類により, ルーバ内壁の反射率が変化し, 結果としてルーバ効率やルーバの光束変化率が変わるので, 表1に計算と実験に用いた白色蛍光ランプの初期分光放射発散度を光源として計算した値で, マンスセル値, 視感反射率, 色度を示す。

(2) 計算結果と検討

図3に計算結果の一例として, ルーバ内壁が青色の場合のルーバ下面の分光放射発散度を示す。分光放射発散度はルーバの遮光角が小さい程大きくなっている。これは, ルーバの遮光角が小さい程ルーバ下面に達する直射成分が多いためである。

ルーバ下面より射出する放射の波長特性を示すために, (11)式により分光ルーバ効率 η_λ を計算し, 図5に実線で示した。

$$\eta_\lambda = E_{5\lambda} / (M_{01\lambda} + R_{2\lambda} \cdot E_{1\lambda}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

分光ルーバ効率はルーバの遮光角が小さい程大きい, これは, ルーバ下面に達する放射の直達成分の割合が大きいからである。

また, ルーバ内壁の分光反射率の高い波長域で分光ルーバ効率は高くなっているが, これはルーバ内の相互反射効果による影響であり, ルーバ内壁が青色の場合には, 出射光は入射光より青味の強い光色となることがわかる。どの遮光角でも分光ルーバ効率の最大値をとる波長は465 [nm] で, 最小値をとる波長は610 [nm] である。分光ルーバ効率の最小値に対する最大値の差は $\phi = 27^\circ$ で19.2 [%], $\phi = 45^\circ$ で36.0 [%], $\phi = 63^\circ$ で60.0 [%] となり, ルーバの遮光角が大きいほど出射光は入射光より青味が強い光色となることを示している。

また, (12)式によりルーバの分光変化率 C_λ を計算し, 図5に破線で示した。

$$C_\lambda = E_{5\lambda} / M_{01\lambda} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ルーバの分光変化率は分光ルーバ効率より若干高い値となる。その度合はルーバ内壁の分光反射率が高い波長において, より大きくなる。ルーバの分光変化率の最大値をとる波長と最小値をと

図5 青色ルーバの分光ルーバ効率とルーバの分光変化率

Fig. 5 Spectral efficiency and spectral changing rate of blue louvers.

る波長は分光ルーバ効率の場合と同じである。ルーバの分光変化率の最小値に対する最大値の差は $\phi = 27^\circ$ で23.5 [%], $\phi = 45^\circ$ で41.9 [%], $\phi = 63^\circ$ で66.3 [%] となり, 分光ルーバ効率と同様にルーバの遮光角が大きいほど大きくなるが, それらの値は分光ルーバ効率の最小値に対する最大値の差より数%大きい。

3.2.2 JIS 標準色票をルーバ内壁に使用して, 彩度を变化させた場合の計算例⁸⁾

(1) 計算条件

- ① ルーバ上面の光源 $M_{01\lambda}$ は白色蛍光ランプの分光特性を持つ均等拡散光源 (図6に示す) である。
- ② ルーバ上面の下向き分光等価反射率 $R_{2\lambda}$ は図6に示す。
- ③ ルーバ下面の上向き分光等価反射率 $R_{3\lambda} = 0$ とする。
- ④ ルーバの条件としては, 下記のように合計60種類である。
 - a) ルーバ形状は正方形で一辺の長さ $a = 200$ [mm] とし, 高さ c が $a/2$, a , $2a$ の3種類 (遮光角 $\phi = 27^\circ, 45^\circ, 63^\circ$) とする。
 - b) ルーバ内壁の色には, JIS 標準色票を用いる。色相は5 B (青), 5 G (緑), 5 Y (黄), 5 R (赤) の4種類, 明度は5一定とし, 彩度 C を2~12まで変化させる。ルーバ内壁色の色度点を図7に示す。

(2) 計算結果と検討

図6 光源の初期分光放射発散度とルーバ上面の下向き分光等価反射率

Fig. 6 Initial spectral radiant exitance of the source and spectral equivalent reflectance on the uppersurface of a louver.

図7 ルーバ内壁色（標準色票）の色度
Fig.7 Chromaticity of the inside wall of louvers (standard colour atlas).

ルーバサイズは $200 \times 200 \times 200$ [mm]、ルーバ内壁色の色相が赤の場合で、彩度を変化させたときの内壁色の分光反射率とルーバ下面の分光放射発散度を図8に示す。彩度が大きくなると、相互反射効果により長波長側の分光放射発散度が増加し、より光色が赤くなる。

図9に、ルーバ内壁色の色相を緑として、彩度を変化させたときの、内壁色の分光反射率とルーバ下面の分光放射発散度を示す。彩度が大きくなると、相互反射効果により520[nm]前後の分光放射発散度が増加し、光色の緑味が強くなる。

図10にルーバ内壁の彩度を変化させたときの、ルーバ下面の光色の色度変化を示す。ルーバの遮光角を一定とした場合、各色共に彩度の増加に伴い、ルーバ下面の光の色度は各色のスペクトル色度点方向へ、移行している。これは彩度の高い方がルーバ内壁で反射した光の色味が強いためである。また、色度点の移動は相互反射の影響によりルーバの高さが高い程、すなわちルーバの遮

図8 彩度毎のルーバ下面の最終分光放射発散度とルーバ内壁の分光反射率（赤）
Fig.8 Spectral radiant exitance after interreflection on the undersurface of louvers and spectral reflectance of the inside wall of red louvers.

図9 彩度毎のルーバ下面の最終分光放射発散度とルーバ内壁の分光反射率（緑）
Fig.9 Spectral radiant exitance after interreflection on the undersurface of louvers and spectral reflectance of the inside wall of green louvers.

図10 ルーバ内壁色毎のルーバ下面の光の色度
Fig.10 Chromaticity of light on the undersurface of louvers in varying louver's colors.

光角が大きい程大きくなる。

次に、ルーバの内壁色と遮光角の条件によるルーバ下面の光色の变化の程度を明らかにするために、(13)式により色度点変化率を定義する。

$$\text{色度点変化率} = \frac{\text{光源とルーバ下面の光色の色度点間の距離}}{\text{光源とルーバ内壁色の色度点間の距離}} \times 100 [\%] \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、光源とルーバ下面の光色の色度点間の距離とは、光源とルーバ内壁色の色度点を結ぶ直線上へ、ルーバ下面の色度点より垂直に下ろした色度点と光源の色度点との距離である。

図11にルーバ内壁色各色のルーバの遮光角に対する色度点変化率を彩度をパラメータとして示した。彩度を一定とすると、ルーバの遮光角が大きい程ルーバ下面より出射する相互反射成分が大きくなるので、各色共にルーバの遮光角が大きい程色度変化は大きくなる。ルーバの遮光角が 27° （高さが100 [mm]）の場合色度点は光源とルーバ内壁色との色度点間距離の1割程度、ルーバの遮光角が 63° （高さが400 [mm]）では2～3割移動する。

ルーバの遮光角を一定とすると、彩度変化に伴う色度点の変化はルーバ内壁の色によって異なる。青色の場合は彩度が高くなっても色度点変化率はほぼ一定である。緑色の場合は彩度が高くなると色度点変化率は減少する。黄色の場合も程度は緑色より小さいが彩度が高くなると色度点変化率は減少する。逆に赤の場合は彩

図11 ルーバの遮光角とルーバ下面の光色の色度点変化率
Fig.11 Shielding angles of louvers vs. chromaticity changing rates of luminous colors on the undersurface of louvers.

度が高くなると、色度点変化率は増加する。この理由は次のように考えられる。相互反射によって間接放射分が増加し、ルーバ下面の光色が変化するのであるから、分光反射率の変化が大きい程色度は大きく移動する。ここで、図8の赤色の分光反射率を見ると、彩度が2から6に変化すると最大反射率は12 [%] も増加するのに対し、図9の緑では最大反射率は6 [%] しか増加しない。よって、赤色の場合は彩度変化に伴い色度点が大きく移動し、色

度点変化率も増加したものと考えられ、逆に緑色の場合は彩度変化に伴う色度点の変化も小さく、色度点変化率は減少したものと考えられる。

4. 有彩色ルーバの光学的特性の測定

分光ルーバ効率、ルーバの分光変化率、ルーバ下面の分光放射発散度の計算法の妥当性を確認するために、一升の有彩色ルーバ

を製作し、光学的特性（ルーバ効率、ルーバの光束変化率、ルーバ下面の光の色度）の測定を行い、3.2.1節の計算値との比較を行う。

4.1 測定装置

(1) 光源

図12に実験装置を示す。光源には20W 白色蛍光ランプ 6 灯用乳白アクリルパネル付き器具を用い、ルーバ上面に均一な拡散光が入射するようにした。蛍光ランプには500時間エージングしたものを用いた。光源の大きさをルーバ升目の寸法と一致させるために、200×200 [mm] の正方形の穴を開けたアルミ板を、ルーバとアクリルパネルの間に挿入し、ランプ側は白色に外側は黒色に塗装した。

光源の初期分光放射発散度 $M_{01\lambda}$ は、3.2.1節で示した。また、図13にこの光源の配光を示す。理論計算の配光は真円配光であるが、測定用光源の配光は少し細長い楕円になっている。また、この光源の輝度の均斉度は0.94であり、ほぼ均一と見なせる。

(2) ルーバ上面の下向き分光反射率

器具内部における反射を含む開口部パネル面の分光反射率（ルーバ上面の下向き分光等価反射率 $R_{2\lambda}$ と等しい）を図4に示す。

図12 実験装置（立面の断面図）
Fig.12 Experimental device (cross section).

図13 光源の配光
Fig.13 Distribution of luminous intensity of the source.

(3) ルーバの条件は、3.2.1節(1)~④と同様で、合計9種類である。

4.2 測定方法

有彩色ルーバのルーバ効率、ルーバの光束変化率、ルーバ下面の光の色度は、ルーバ上面の最終輝度とルーバ下面の照度と色度を測定することにより求めた。

(1) 光源の輝度と色度の測定

光源面を9等分した各面の中心点の分光放射輝度を分光放射輝度計（トプコン製SR-1型）で測定し、それらの平均分光放射輝度 $\overline{L_{01\lambda}}$ より光源の初期分光放射発散度 $M_{01\lambda}$ ($=\pi \times \overline{L_{01\lambda}}$) を得た。これを図3に示す。この $M_{01\lambda}$ は、理論計算の初期値として使用する。また $M_{01\lambda}$ より光源の初期入射光束 Φ_0' と色度の測定値も得る。

なお、計算値の初期値 $M_{01\lambda}$ は分光測光方式の分光放射輝度計により測定した値を使用するので、理論計算によって得られるルーバ下面の最終出射光の色度は非常に正確と考えられる。これに対し、ルーバ下面の最終出射光の色度は色彩色差計（ミノルタ製CL-100型）を用いて測定した。この色彩色差計は三刺激値直読方式なので測定値に少し誤差を含むものと考えられる。

そこで、光源面より1cmの位置における光源の色度を色彩色差計によっても測定し、両側定法によって得られた光源の色度差によって色彩色差計の測定値の色度を補正した。

(2) ルーバ上面の最終入射光束と色度の測定

光源に有彩色ルーバを装着した状態で、ルーバ上面を9等分し、その各面の中心点の輝度と色度を分光放射輝度計で測定し、それらの平均値より、最終輝度 L_1' と最終入射光束 Φ_1' および色度の測定値を得た。

(3) ルーバ下面の最終出射光束と色度の測定

光源に有彩色ルーバを装着した状態で、ルーバ下面を9等分した各面の中心点の照度と色度を色彩色差計で測定し、それらの平均値より最終出射光束 Φ_5' と色度の測定値を得た。

ルーバ効率の測定値 η' は $\eta' = \Phi_5' / \Phi_1'$ より得た。

ルーバの光束変化率の測定値 C' は $C' = \Phi_5' / \Phi_0'$ より得た。

5. 計算値と測定値の比較

5.1 ルーバ下面の出射光の色度

図14にルーバ下面の光の色度の計算値を実線で、測定値を破線

図14 ルーバ下面の光の色度
Fig.14 Chromaticity of light on the undersurface of louvers.

で示す。なお、測定値は両測定法による光源の色度の差を用いて補正した。

計算値と測定値はほぼ一致しており、正常な人の目を見たかぎり、色の差が区別されず理論計算法は妥当であると言える。

遮光角が大きくなる（ルーバの高さが高くなる）のに伴って、測定値と計算値の色度点は共に、ルーバ内壁色の色度点方向へ移動し、光色の色味が増加しているのは、相互反射による効果である。

5.2 ルーバ効率とルーバの光束変化率

図15にルーバ効率の測定値と計算値の比較を示す。ルーバ効率の測定値と計算値の差は、平均誤差で5.9 [%]、最大誤差で

図15 ルーバ内壁の平均反射率とルーバ効率の関係における計算値と測定値の比較

Fig.15 Comparison between calculated values and measured values of average reflectance vs. efficiency of louvers.

図16 ルーバ内壁の平均反射率とルーバの光束変化率の関係における計算値と測定値の比較

Fig.16 Comparison between calculated values and measured values of average reflectance vs. flux changing rate of louvers.

10.1 [%] であり、実用的範囲で一致している。

なお、ルーバの遮光角が小さい程、測定値の方が計算値より小さくなる傾向があるのは、図13に示すように光源の配光が真円ではなく楕円となっているので、最終入射光束を $\pi L_1' \times 0.04$ とするとやや大きめに光束を見積ったことになり、その誤差はルーバの遮光角が小さい程大きいためである。

ルーバの光束変化率を図16に示す。測定値と計算値の差は平均誤差で6.7 [%]、最大誤差で12.0 [%] であり、ルーバ効率の差と同程度であった。

6. 結論

- (1) 分光ルーバ効率は、ルーバ上面の下向き分光等価反射率と光源の分光特性に依存しない。また、ルーバの分光変化率は光源の分光特性に依存しない。
- (2) 有彩色ルーバのルーバ下面の光の色度点はルーバの内壁色の彩度の増加に伴い、光源の色度点からルーバ内壁色の色度点方向へ移動する。また、色度点の移動はルーバの遮光角が大きい程（ルーバの高さが高い程）顕著である。
- (3) 分光ルーバ効率、ルーバの分光変化率、ルーバ下面の分光放射発散度、ルーバ下面の光の色度の有彩色ルーバの光学的特性の理論解析法を提案し、理論計算例を示した。
- (4) 本理論解析法を用いたルーバ下面の光色とルーバ効率およびルーバの光束変化率については実験より得た測定値と計算値との比較を行った結果、有彩色ルーバの光学的特性の理論解析法が妥当であることが明確となった。

7. まとめ

筆者らは、総合的有彩色ルーバ天井照明の設計方法を提案する予定である。本報告では、有彩色ルーバ天井照明の計算要素として重要なルーバの光学的特性の理論計算法を提案した。

本報告で示した結果より、ルーバ方式照明器具の波長毎の器具効率からルーバの分光変化率から得られる。また、ルーバ下面の分光放射照度からルーバ下面より射出する光の色度と光束を得る計算法を提案したが、従来のルーバ方式照明器具の無彩色ルーバに換えて、有彩色ルーバをユニット部品として用いれば、簡易な光色変換照明器具となり、その器具の光色や光束は本理論計算法を用いて計算可能である。

参考文献

- (1) 田淵, 西村, 中右, 口石, 佐土根: ルーバ照明の計算法の研究 (その2) — 正方形ルーバの配光の計算法の理論的検討と実測評価 —, 照学誌, 69-2, pp.81-87 (昭60)
- (2) 田淵, 西村, 中右, 平田, 佐土根: ルーバ照明の計算法の研究 (その1) — 正方形ルーバの配光の計算法の理論的検討と実測評価 —, 照学誌, 69-2, pp.75-80 (昭60)
- (3) 西村, 佐土根, 中右, 平田, 田淵: ルーバ効率の理論計算に関する一考察, 照明学会全国大会, p.80 (昭58)
- (4) 田淵, 中右, 西村, 佐土根: ルーバ効率の推定計算と実測評価, 照明学会全国大会, p.81 (昭58)
- (5) 照明学会編: ライティングハンドブック, オーム社 (昭62)
- (6) 松浦邦男: 室内の相互反射, 照学誌, 41-12, pp.27-33 (昭32)
- (7) 西村, 和田, 饗庭, 佐土根ほか: 有彩色ルーバ照明の研究 II — 分光ルーバ効率について —, 電気関係学会東海支部連

大, p.545 (平6)

- (8) 西村, 饗庭, 佐土根ほか: 有彩色ルーバ照明の研究 I, 電気関係学会東海支部連大, p.553 (平5)

(受付日1996年5月7日/採録日10月8日)

にしむら まさのぶ
西村 政信 (専門会員)

大同工業大学

昭和25年5月5日生まれ, 昭和49年3月名古屋工業大学第二部電気工学科卒業, 昭和61年4月大同工業大学電気工学科助手, 平成元年4月同講師, 現在に至る. 昼光・日射の連続測定に関する研究, 快適視環境の研究に従事. 平成3年より照明学会東海支部評議員, 建築学会・日本色彩学会・日本照明委員会会員, 昭和61年照明学会研究奨励賞受賞.

わだ まさや
和田 昌也 (准員)

大同工業大学

昭和47年6月6日生まれ, 平成7年3月大同工業大学工学部電気工学科卒業, 現在大同工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程2年在学. 有彩色ルーバを用いた室内空間における照明効果の理論解析を研究.

あいば すすむ
饗庭 貢 (専門会員)

金沢工業大学

昭和5年5月17日生まれ, 昭和28年3月金沢大学工学部電気工学科卒業, 金沢工業高等専門学校教授を経て昭和54年金沢工業大学教授, 現在に至る. 磁気浮上磁気推進リニアモーターカー, 新交通システム, 新しい美術館照明, 景観照明, 雷現象と雷防護, 電気気象環境の研究に従事. 工学博士. 昭和59年オーム技術賞, 平成2年電気学術振興賞進歩賞, 同年小平記念賞受賞. 電気学会・日本色彩学会・電気設備学会・テレビジョン学会会員, 照明学会参与.

さとね はんじ
佐土根 範次 (名誉会員)

トーエネック技術短期大学校

大正9年9月29日生まれ, 昭和16年3月浜松高等工業学校電気学科卒, 電気試験所(現電子技術総合研究所)大阪支所, 松下電器照明研究所研究室長を経て, 大同工業大学電気工学科教授, 平成3年3月定年退職, 平成4年4月よりトーエネック技術短期大学校非常勤講師, 現在に至る. 工学博士. 熱放射・赤外・紫外の計測と応用, 屋内照明快適環境の研究, 照明学会・日本色彩学会名誉会員, 東海支部顧問, 空気調和衛生工学会・電気学会・日本照明委員会会員.