V 型溝内面の相互反射と色ずれ

正 会 員 福 井 和 久 海*

Interflection and Color Shift on Surfaces with Multiple V-shaped Grooves

Wakumi Fukui (Member)

(Himeji Institute of Technology)

ABSTRACT

Specimens used in this experiment are multiple V-shaped grooves with included angles of 60° , 30° , 15° and flat surfaces made of aluminium. Their surfaces were coated with three kinds of colors, blue, reddish purple and yellow after sprayed with primer.

Their spectral reflectance curves were taken by G.E. Recording Spectrophotometer, and their chromaticities and luminous reflectances calculated to be compared with the analytical results.

Consequently, general tendency of color shift, monochroic- and dichroic color shift due to the increase of interflection could be traced.

1. 緒 言

最近、照明および熱の分野において相互反射が取り上げられているが、これは照明では室内における相互反射とそれに伴う色ずれの問題となっており、一部に検討¹⁾されている。

他方、California 大学工学部の O'Brien 教授の研究室では、平板をV型に重ねてその相互反射の計算と実験を行っていたので、この実験に関連して相互反射と色ずれの関係を検討すべく、同教授の指示のもとに試料を製作して測定と計算を試みた。

2. 試料および測定

まず頂角 θ が 60° , 30° , 15° であるような幾つかのV型溝を表面にもつ直方体と、基準となる平面板 ($\theta=180^\circ$) をアルミニウムを用いて製作し、その表面にはプライマーを塗布した後、青色、黄色、赤紫色の塗料を吹きつけて試料とした。これらの塗料はいずれも不透明、拡散性のもので、種類および色は次のようである。

- 青色塗料……Pittsburgh Paints, 5-p-19.
- 黄色塗料……Pittsburgh Paints, Yellow, 11-2.
- 赤紫色塗料……Tempera, Magenta.

第 1 図 アルミニウムV型溝の分光反射率曲線
 --- 測定値 (計算基準)
 測定値 ——— 計算値

第 2 図 青色V型溝の分光反射率曲線
 --- 測定値 (計算基準)
 測定値 ——— 計算値

* 姫路工業大学

第3図 黄色V型溝の分光反射率曲線
 --- 測定値 (計算基準)
 測定値 ——— 計算値

第4図 赤紫色V型溝の分光反射率曲線
 --- 測定値 (計算基準)
 測定値 ——— 計算値

また、試料の大きさは $42.9 \times 42.9 \times 38.1 \text{ mm}^3$ で、溝の間隔は約 4.8 mm である。

これらの試料の分光反射率をGE製の自記分光光度計によって測定して分光反射率曲線を得、それから計算によって種々の結果を導き出した。

試料製作過程および製作後にとった分光反射率曲線を第1, 2, 3, 4図に示す。

3. 相互反射

完全拡散性をもつ n 個の平面からなる相互反射系において、面 i の初期光束発散度を L_{0i} 、相互反射後の光束発散度を L_i 、反射率を ρ_i とすると、次の関係式が成立する²⁾。

$$L_i = L_{0i} + \rho_i \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n F(i, j) L_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $i=1, 2, \dots, n$

$$F(i, j) = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{r_{ij}^2} dA_i dA_j \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A_i : 面 i の面積、 $F(i, j)$: 面 i, j 間の Shape Factor、 r_{ij} : 面 i および面 j 上の微小面積 dA_i および dA_j 間の距離、 θ_i, θ_j : 面素 dA_i および dA_j の法線とそれらを結ぶ直線とのなす角度である。

測定に使用した分光光度計では、試料にほとんど垂直に平行な単色光が入射していると考えられるから、次のような仮定をおいて、V型溝内面における相互反射の式を簡単にして計算をすすめた。

- (1) V型溝の対称軸に平行な光が溝の表面に一樣に入射する。
- (2) V型溝表面は全体にわたって完全拡散性である。
- (3) V型溝は無限長、かつ対称である。

第5図 V型溝のモデル

第5図において、V型溝の側面をそれぞれ面1, 2、開口部を面3とし、面1, 2のなす角度を θ 、分光反射率を ρ_i 、単位面積当たりの入射光束を L_0 とすると、面1, 2は対称であるから、これらの面の光束発散度はともに等しくして

$$\rho_i \cdot L_0 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

となる。これを初期光束発散度 L_{0s} とおくと、

$$L_{01} = L_{02} = L_{0s} = \rho_i \cdot L_0 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

面1, 2の相互反射後の光束発散度を L_s とすると、(1)式から

$$L_1 = L_2 = L_s = L_{0s} + \rho_i F(1, 2) L_s$$

実効反射率を ρ_{ieff} とすると、

$$\rho_{ieff} = \frac{(\text{Flux out})}{(\text{Flux in})} = \frac{F(3, 1+2) \cdot L_s \cdot A_3}{L_0 A_3}$$

ただし、 A_3 : V型溝の開口部3の面積。

(2)式を参照して

$F(1, 2)$: 面1, 2の間の Shape Factor。また

$$F(1, 2) = 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^3$$

$F(3, 1+2)$: 面3と面1, 2との間の Shape Factor

この場合、面 3, 1, 2 は閉面を形成するから、

$$F(3, 1+2)=F(3, 1)+F(3, 2)=1$$

$$\therefore \rho_{\text{leff}} = \frac{\rho_{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 - \rho_{\lambda} \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]} \quad (3)$$

ここで、分光反射率 ρ_{λ} にかえて反射率 ρ を用いると、その実効反射率 ρ_{eff} は次のようになる。

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{\rho \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 - \rho \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]} \quad (4)$$

ただし、

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda} P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda}$$

各色の平面 ($\theta=180^\circ$) の試料の示す分光反射率曲線と上記の式とから、 $\theta=60^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ の場合の計算を行なって結果を図示すると、前掲の第 1, 2, 3, 4 図の実線の部分となる。

次に (3), (4) 式から、分光反射率 ρ_{λ} と実効分光反射率 ρ_{leff} および反射率 ρ と実効反射率 ρ_{eff} との関係を $\theta=$

第 6 図 相互反射による実効分光反射率の変化
 青色 V 型溝 黄色 V 型溝
 --- 青紫色 V 型溝

第 7 図 相互反射による実効反射率の変化
 — 計算値 ○: $\theta=60^\circ$ 測定値
 ●: $\theta=30^\circ$ 測定値
 ◎: $\theta=15^\circ$ 測定値

$180^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ の各場合について計算し、これらと測定値とを比較すると、第 6 図、第 7 図となる。

$\theta=60^\circ$ のものでは測定値と理論値とがよく一致しているが、 $\theta=30^\circ, 15^\circ$ と角度が減少するにつれてずれが大きくなっている。また一般に ρ_{λ}, ρ の値が大きくなると、 $\rho_{\text{leff}}, \rho_{\text{eff}}$ が相対的に減少しているが、これも θ が小さくなるほどずれが大きくなっている。

4. 色 ず れ

CIE の測色値 x, y, Y は次の式によって計算される。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} \rho_{\lambda} \begin{pmatrix} \bar{x}_{\lambda} \\ \bar{y}_{\lambda} \\ \bar{z}_{\lambda} \end{pmatrix} d\lambda.$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{X+Y+Z} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$K = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \right)^{-1}$$

ここに、 $\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$: スペクトル三刺激値、 ρ_{λ} : 分光反射率、 P_{λ} : 分光エネルギー分布。

第 8 図 アルミニウム (A) およびブルー塗布 (P) V 型溝の色ずれ
 — 計算値 測定値

第 9 図 青色 V 型溝の色ずれ
 — 計算値 測定値

第 10 図 黄色 V 型溝の色ずれ
—— 計算値 …… 測定値

第 11 図 赤紫色 V 型溝の色ずれ
—— 計算値 …… 測定値

以上の式と前掲の分光反射率曲線とから計算して得られた測色値を uv 座標上に記入すると、第 8, 9, 10, 11 図となる。ただしこの計算は C 光源を基準として行なった。

理論値から測定値がずれる様子を色度図上に表示すると、第 12, 13, 14, 15 図のようになる。ここでは C 光源の色度点を中心として、各色度点をスペクトル色軌跡上および純紫軌跡上、あるいはこれらに平行な線上に投影してずれの方向と大きさを示した。

これをまとめると次のようになる。

(1) 理論値からのずれの方向 黄色の試料では、ずれは時計の回転と反対の方向であるが、赤紫色および青色の試料では時計の回転方向になっている。これら二つの相反する方向をもつずれは、スペクトル色軌跡上 540

第 12 図 アルミニウム (A) およびプライマー塗布 (P) V 型溝の色度の計算値と測定値とのずれ
—— 計算値 …… 測定値

第 13 図 青色 V 型溝の色度の計算値と測定値とのずれ
—— 計算値 …… 測定値

第 14 図 黄色 V 型溝の色度の計算値と測定値とのずれ
—— 計算値 …… 測定値

第 15 図 赤紫色 V 型溝の色度の計算値と測定値とのずれ
—— 計算値 …… 測定値

～570 nm 付近で合する。この結果、第 12 図のアルミニウム試料にみられるように、ずれの方向が一様でなくなる。

(2) 理論値からのずれの大きさ 黄色、赤紫色および青色の試料では、ずれはいずれも $\theta=15^\circ$ のものが最大、 $\theta=60^\circ$ のものが最少であるが、前述の範囲では逆に $\theta=15^\circ$ のものが最小、 $\theta=60^\circ$ のものが最大であったり、三者が類似した大きさを示すようになっている。

以上の変化は、相反する方向と異なる大きさをもった二つのベクトル和に類似している。

さて、目は色の弁別にすこぶる敏感であるといわれる

から、測定もさることながら、これらの試料を目で観察したときの色ずれの感じ方も興味ある問題である。

概観したところでは、いずれも溝が深くなるにつれて明度が低下して色が暗くなり、これが色ずれの感じを左右するようであった。このうち、黄色の試料では、 $\theta = 60^\circ$ になるとわずかに緑色がかった黄色の反射光がちらつくようになり、 $\theta = 30^\circ, 15^\circ$ となるのにつれて、このちらつきの消えていくのが観察された。

5. 考 察

(1) 試料表面の完全拡散性からのずれ 加工直後のアルミニウム試料にはにぶい金属光沢があり、その分光特性(第1図)でも理論値よりかなり増加したものがあるのをみると、この試料では正反射性が残り、完全拡散性からはずれていたことが考えられる。

この素材の上に不透明、拡散性の塗料を吹きつけると当然拡散性が増す。そして測定値も理論値に近づいてきてはいるが、概して反射率の高いところでそれより減少したものとなっている(第2, 3, 4図)。こうしたずれは試料の表面が完全拡散性でなかったことにあるといえる。

(2) 試料の取付け位置 GE 分光光度計では標準白色板と平面の試料とを同じ相対位置において測定することになっていて、この位置からずれると測定値が変わるともいわれる。

第 16 図 試料の取付け位置

この実験では第 16 図のように、試料の三角形の頂点の形成する平面を標準白色板の表面と同じ相対位置になるように取り付けて測定した。したがって V 型溝の頂角が $60^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ となるのに応じて溝の底はそれぞれ約 4.1, 8.9, 18.2 mm の深さになった。

ゆえに測定面のずれによって誤差が起こるときには、頂角の小さいものほど

大きくなっていく。

(3) 試料の形 V 型溝をつくる際には底部の成形が困難で変形をさけ得ず、その上、塗料を吹きつけるとそれが底にたまって U 字形となる。また三角形の頂点のところでも同様な変形のあることが考えられる。こうした変形は頂角が小さくなるほど著しくなり、誤差の原因となる。

さらに、溝は有限長であったから測定時にその端の部分からもたらされる影響も無視できないものであったろう。

こうしたさまざまな原因のために、測定結果は理論値からずれ、ここに示したような分光反射率曲線、実効反射率および色ずれを示すものになった。

(4) 色ずれ 相互反射に基づく色ずれの様子を見ると、大体その主波長方向にずれるといつてよいが、詳細に検討すると Monochroic Color Shift と Dichroic Color Shift に分類されるようである。

i) Monochroic Color Shift 分光反射率曲線が一つの最大値を有するもの、あるいはこれに類似するような色では相互反射が増すと、一般にその色は主波長方向にずれる。この実験では、赤紫色試料以外のものがすべてこれに属する。

ii) Dichroic Color Shift⁴⁾ 分光反射率曲線が波長の長い側と短い側にそれぞれ極大値をもつもの、あるいはこれに類似する色の場合、相互反射が増すと色は光源の色度点と大体主波長 600~650 nm を結ぶ線に平行にずれる。すなわち、その色は主波長の示す色よりも赤が加ってくる。この実験では赤紫色の試料がこの傾向を示している。この現象は黒沢博士の報告⁵⁾にもみられるが、これは二つの極大値をもつ X のスペクトル刺激値曲線とこの種の色の分光特性とが似ていることに関係があるように思われる。

6. 結 言

この実験は V 型溝および円すい孔^{6,7)}について試みたものであるが、試料の製作、分光光度計による測定および色度計算などは O'Brien 教授のもとで行なった。この間、懇切に指導して下さった同教授および、実験中さまざまな点で援助して下さった大学院学生諸君と職員のかたがたに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 納谷・山中：昭 36 電気関西支部連合大会 (222)
- (2) 佐土根・森田・猪野原：照学誌 49 (昭 40) 4
- (3) J. Psarontharis: AIAA 1 (1963) 1880
- (4) W.D. Wright: The measurement of Color. 235
- (5) 黒沢：東芝レビュー 17 (1962) 927
- (6) 福井：昭 40 電気四学会連合大会 (1282)
- (7) 福井：姫路工大研究報告 17 (1964)

(受付 1965 年 5 月 14 日)