色彩提示に基づく窓ガラス透過光の色彩設計および 赤外線制御性能向上を目的とした光学多層膜構造設計

Structural Design of the Multilayer Coatings on Windowpane for the Required Sense of Color and the Infrared Radiation Control

○学 高橋 史晴・信州大院

学 滝沢 旬平・信州大院

正 中村 正行・信州大学

Fumiharu TAKAHASHI,
Graduate School of Shinshu University

Junpei TAKIZAWA,
Graduate School of Shinshu University

Masayuki NAKAMURA,
Shinshu University

Key Words: Optimum Design, Inverse Analysis, Color Design, Chromaticity Diagram, Optical Multilayer Coatings, Windowpane

Windowpane with optical multilayer coatings has ability to control the color and solar energy through the glass. The optical transmittance in the visible region is affected by the interference in the multi-layer coatings. It follows that any color emerges on the scenery through the window. Therefore, it is important to design the color according to the user's own preferences for residential usage. The chromaticity diagram can indicate a specific color by using RGB values in the two-dimensional diagram. This paper reports on the results of design of the multilayer coatings to satisfy the user's sense of the color using the uniform chromaticity scale diagram.

1. はじめに

住宅において窓ガラスは熱の流入出が最大になる部分である。太陽からの輻射熱を窓ガラスで制御し、冷暖房負荷の抑制に効果的な省エネルギー仕様の窓ガラスが注目されている。一方で、太陽光エネルギー制御性能を高めるために窓ガラス表面にコーティングを施すと可視光透過スペクトルが変化するため、ガラス越しの風景に自然な状態とは異なる色彩が現れる。そのため、窓ガラスでの太陽光制御においては、熱線である赤外線制御と透過性を確保するための可視光制御を同時に達成する必要がある。

本研究では人の感性に基づいた色彩を示す光学多層膜付加窓ガラスを実現することを目的に、多層膜構造設計について検討を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。光学多層膜をコーティングした窓ガラスは、季節ごとの太陽の入射角度の差を利用し、赤外線は季節を通して制御し、可視光は望みの色彩を示すように制御する。制御波長域ごとに目標値を定め、多層膜構造を適切に設計することで、選択した色彩を実現する分光特性を得ることができる。ここでは、色彩の選択にディスプレイなどの発光色の評価に用いられる $u'v'$ 均等色度図を利用して、より感性に近い色彩を実現する方法について検討する。

2. 色度図による色彩選択

2.1 $u'v'$ 均等色度図の利用

xy 色度図は、色度図上における距離が物理量である XYZ 値の差を示すが、それが人の感覚における差とは異なるため色空間の均等性が保障されておらず、色差を扱うのには適さない。均等色空間という色差を定量的に扱うための表色系がFig.1に示す $u'v'$ 均等色度図であり、この色度図では色空間が均等になる。均等色度図は色彩を感覚的に決定することに優れており、 $u'v'$ 均等色度図の色を選択することで、より感性に合った色の色度座標を感覚的に選択することができる。色度座標 (x, y) から色度座標 (u', v') への変換⁽³⁾を次に示す。

$$\begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x+12y+3} \\ v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 分光透過率同定逆解析

光学多層膜の設計において望みの色彩を実現するためには、色度図によって選択した色彩から設計の目標値となる可視領域の分光透過率を求める必要がある。望みの色彩に対応する三刺激値から逆解析により選択した色彩を示す分光透過率を同定することが可能である⁽²⁾。色度図を用いて選択した色彩に対する三刺激値を用いて、特定の色彩に相当する分光透過率を導出する問題を最適化問題に帰着させて解く。この最適化問題を次に示す。

$$(1) \text{制約条件} \quad 0 \leq T(\lambda) \leq 100\% \quad (2)$$

$$(2) \text{評価関数}$$

$$W = c_x \left(\frac{X_T - X}{X_{\max}} \right)^2 + c_y \left(\frac{Y_T - Y}{Y_{\max}} \right)^2 + c_z \left(\frac{Z_T - Z}{Z_{\max}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} X = k \int_{\text{vis}} \bar{x}(\lambda) O(\lambda) T(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{\text{vis}} \bar{y}(\lambda) O(\lambda) T(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{\text{vis}} \bar{z}(\lambda) O(\lambda) T(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (4)$$

$$k = 100 / \int_{\text{vis}} \bar{y}(\lambda) O(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$(3) \text{最適化パラメータ} \quad \mathbf{P} = \{ a_1, a_2, \dots, a_{m-1}, a_m \} \quad (6)$$

Fig.1 $u'v'$ uniform chromaticity scale diagram

ただし、 T は透過率を表わし、次式で与えられる。

$$T(\lambda) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} a_m e^{2\pi i m \lambda / M} \quad (7)$$

λ は波長、 X_T , Y_T , Z_T は目標の三刺激値、 X , Y , Z は三刺激値、 $X_{\max}$, $Y_{\max}$, $Z_{\max}$ は三刺激値の最大値、 $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ はCIE等色関数、 O は標準の光 D_{65} 、 c_x , c_y , c_z は重み係数、 vis は可視光波長、 M は可視領域の計算点数を表す。最適化パラメータは式(7)の離散逆Fourier変換の係数 a_m とし、係数 a_m を決定することにより分光透過率を求める。この最適化問題では評価関数 W を最小とするようにパラメータの値を求める。

3. 色彩の再現性の確認

3.1 光学多層膜構造の最適設計

色度図によって選択した色彩がFig.2に示すような多層膜構造によって実現できるか確認するために、逆解析によって得られた分光透過率をもとに多層膜構造の設計を行う。多層膜の設計には著者の一人が開発した遺伝的アルゴリズムを用いた光学多層膜最適設計システムを使用する。これにより、赤外線制御と可視光による色彩の制御が同時に可能である。色度図によって得られたRGB値と設計した多層膜構造のRGB値を比較することによって色彩の再現性を確認する。

3.2 設計仕様

赤外線領域は780~2000nm、可視光領域は380~780nmとして設計を行う。目標の色彩は室内から外の景色を見る色彩であり、色度図から例題として3点選択した。可視光領域の目標値は色度図によって選択した色彩から、最適化パラメータ数を $m=10$ として分光透過率同定逆解析⁽²⁾より求め、目標値に $\pm 5\%$ の幅を与えた値とする。また、赤外線の目標反射率は90~100%とした。多層膜の分光特性は光の入射角に依存する。赤外線は夏季の入射角度を75deg、冬季の入射角度を35degとした。可視光の入射角度は、垂直入射0degとする。基板にコーティングする多層膜の最大層数が10層(外側5層、内側5層)の場合の例について検討する。入射媒質と透過媒質は空気(屈折率 $N=1.00$)、基板には2mmのガラス材BK7($N=1.52$)を用い、コーティング材料には SiO_2 ($N=1.46$)、 Al_2O_3 ($N=1.65$)、 Ta_2O_5 ($N=2.05$)、 TiO_2 ($N=2.24$)、 ZrO_2 ($N=2.04$)、 HfO_2 ($N=1.99$)、 ZnO_2 ($N=2.16$)の7種類から2~3種類を選択するものと仮定する。また成膜可能な膜厚の範囲は30.0~500nmとした。以上の条件より光学多層膜最適設計システムを用いて設計を行った。

3.3 設計結果

Fig.3に設計した光学多層膜付加窓ガラスの可視光領域の分光透過率を示す。窓ガラスの分光透過率はほぼ目標値を満たしているといえる。また、Table 1に色度図によって選択したRGB値と設計した窓ガラスのRGB値の比較を行った。Table 1より、どの例題もRGB値の大きさは同傾向であり、両者の値の差は小さい。また、多層膜を施さないガラスを透過するスペクトルと比較したものをTable 2に示す。色彩を可視化するプログラム⁽¹⁾で色彩を確認したところ、設計した窓ガラスは目標と同系統の色彩を示しており、選択した色彩を実現すると同時に、夏と冬の赤外線制御を可能とする設計結果を得ることができた。

4. おわりに

本研究では、人の感性に基づいた色彩を示す光学多層膜付加窓ガラスを実現するために、 $u'v'$ 均等色度図に基づいて同定した可視光の分光透過率を目標値として多層膜構造を設計した。その結果、多層膜構造最適化によって要求された色彩と熱線制御効果をより精度よく達成することができた。

Fig.2 Structure of multi-layer coatings

Fig.3 Results of identification of transmittance spectrum for Example 1

Table 1 RGB values

	Chromaticity diagram (R, G, B)	Design value (R, G, B)
Example 1	(200, 234, 200)	(189, 230, 198)
Example 2	(215, 215, 240)	(213, 217, 237)
Example 3	(255, 215, 215)	(254, 216, 216)

Table 2 Control performance on transmittance / reflectance %

	Infrared region		Visible region
	Reflectance ($\theta_{\text{sum}}=75$ deg)	Transmittance ($\theta_{\text{win}}=35$ deg)	Transmittance ($\theta_{\text{win}}=0$ deg)
Example 1	51.2	68.8	68.3
Example 2	50.7	72.7	69.3
Example 3	51.1	71.3	71.9
Float glass	34.7	84.0	90.4

参考文献

- (1) 上田純平, 山村知孝, 中村正行, 多層膜窓ガラスの透過光に対する色彩解析と感性設計, 第18回設計工学・システム部門講演会CD-ROM論文集, (2008), pp.225-226.
- (2) 上田純平, 滝沢旬平, 高橋史晴, 中村正行, 色度図と逆解析を用いた光学多層膜付加窓ガラスの色彩選択, 第19回設計工学・システム部門講演会CD-ROM論文集, No.09-6, (2009), pp.507-508.
- (3) 日本色彩学会, 色彩科学ハンドブック(第2版), 東京大学出版会, (1998), p.123.