糸間反射の影響を考慮した交織織物の色彩予測

信州大学繊維学部 清澤 雄・鄭 家明・小松琢也・矢崎美彦・高寺政行・清水義雄

Color Prediction of Union Fabric Considering Mutual Reflection between Yarns

*Takeshi Kiyosawa, Jiaming Zheng, Takuya Komatsu, Yoshihiko Yazaki,
Masayuki Takatera, and Yoshio Shimizu*

Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda-shi,
Nagano 386-8567, Japan

Abstract : A prediction method of surface color of union fabric from individual color of yarns and weave was established. Thirteen color yarns were adopted as yarn samples, and sixty union fabrics consisted of two colors of yarns were weaved as fabric samples. Kubelka-Munk's law and Lambert-Beer's law were used to predict surface color as theory of subtractive color mixing. Moreover the isomeric matching method was used for making spectral reflection factor in prediction. It is an ideal color matching method that spectral reflection factor of object color is matched with spectral reflection factor of assignment color. The relationship among the density of predicted color ($D_F(\lambda)$), the density of warp and weft colors ($D_{warp}(\lambda)$, $D_{weft}(\lambda)$) and the area ratio of warp and weft (S , $I-S$) could be expressed as follows :

$$D_F(\lambda) = S \cdot D_{warp}(\lambda) + (I-S) \cdot D_{weft}(\lambda)$$

In order to reduce the difference between the predicted color and the measured color, the difference between density of warp and weft was considered. As a result, the surface color of union fabric can be predicted accurately.

(Received 20 January, 2006 ; Accepted 29 May 2006)

1. 緒 言

繊維製品を評価する際に視覚特性は重要である。中でも「色」は製品に大きな魅力を与える因子であり、消費者の嗜好や要望に応えるための色彩設計が必要である。

先染織物については設計段階でその色彩予測ができることが望まれている。しかし布地は平面ではなく、立体構造であることから、反射、ハイライト、陰、糸どうしの相互反射などが入り混じり、複雑な混色となるので、設計段階での正確な予測はできていないのが現状である。複雑な視覚特性を持つ先染織物の一つに、交織織物がある。これは経糸と緯糸で質の異なる糸を用いて織った織物であり、異なる糸質が影響し合う風合いがあるのが特徴である。交織織物の中でも、経糸と緯糸に色相の異なる糸を用いて織ったものは玉虫織物やシャンブレーと呼ばれている。複数の色糸を用いて比較的密度の込んだ織りにすると光沢のある布地になり、経糸と緯糸の色の混色により見かけ上独特の色彩を呈する。また、回転や傾斜、しわなどによって見る角度が変わると色糸の見かけの混色割合が変化し、複雑な色彩効果が生まれる。これまで田中[1]、軍司ら[2,3,4]により玉虫織物に関するいくつかの報告がある。これらは玉虫織物の色彩変化を加法

混色で表し、試料を見る方向、照明、受光条件、および繊維表面の凹凸状態により測色値が変化すること、その変化は色糸の色相差が大きいほど顕著であることなどを示している。これらの研究で測定結果から玉虫織物の色彩効果がどのようなものであるかの傾向が明らかになった。しかし、実際にどのような色の糸を用いて織れば目的とする色の織物ができるかということを定量的に予測するまでには至っていない。

布地をデザイン、設計する際やシミュレーションによる色彩評価を行う際などは、用いる糸を決める段階で織りあがった布地の色彩を定量的に予測できることが望まれる。そこで本研究では経糸、緯糸で色の異なる交織織物における織物を正面から見たときの表面の色彩を、経糸と緯糸の色の測定値から予測することを目的とする。

2. 理 論

2.1 減法混色とアイソメリックマッチ

色光の重ね合わせによる混色が加法混色で表されるのに対し、減法混色は色フィルターまたは色素や光の吸収媒質の重ね合わせによる混色に用いられる。減法混色を分光反射曲線で見れば、混合するとそれぞれの吸収部分

に相当するところが重なり、曲線は次第に下部へ移動し、最終的には黒色へ近づくようになる。本研究では交織織物の表面色がこのような減法混色で成り立っているものと考え、Kubelka-Munk の理論と Lambert-Beer の理論という二種類の減法混色理論を用いて色彩予測を試みた。

また、アイソメリックマッチという色合わせにより、指定色(試料の実測値)と試行色(糸の測色からの予測値)の色合わせを試みた。これは物体色そのものの分光反射率を一致させる方法なので、いかなる光源の照明下でも同じ色として等色させることができ、理想的なカラーマッチング方式であるといえる。

Kubelka-Munk の法則は、塗料などの混色、色合わせをする際に用いられる方法である。減法混色では色濃度という値において加法性が成り立つことが知られている。物体色の分光反射率を $R(\lambda)$ 、物体色の粒子層の吸収係数を K 、散乱係数を S とすると、Kubelka-Munk の法則における分光色濃度 $Dkm(\lambda)$ は反射率から吸収、散乱による光の減衰比率を表すもので式 1 より与えられる[5]。

$$Dkm(\lambda) = \frac{K}{S} = \frac{\{1-R(\lambda)\}^2}{2 \cdot R(\lambda)} \quad (1)$$

減法混色の場合、混色結果は混色に用いた各成分間に相互作用がなければ各波長でこの色濃度を加算した分光曲線となる。本研究では経糸と緯糸の面積割合を考慮して混色を考えた。経糸の分光色濃度を $Dkm_{warp}(\lambda)$ 、緯糸の分光色濃度を $Dkm_{weft}(\lambda)$ 、織物表面における経糸の面積割合を S 、緯糸の面積割合を $(1-S)$ とすると混色後の、つまり交織織物の表面色の分光色濃度 $Dkm_F(\lambda)$ は式 2 で表される。ここで糸間の隙間は無視できるものとした。

$$Dkm_F(\lambda) = S \cdot Dkm_{warp}(\lambda) + (1-S) \cdot Dkm_{weft}(\lambda) \quad (2)$$

$Dkm_{warp}(\lambda)$ 、 $Dkm_{weft}(\lambda)$ は糸の状態で測色した分光反射率から得られる値であり、 S も経糸、緯糸が同じ糸であれば、織組織と織密度から求めることができるので、糸間の相互作用がなければ式 2 より糸の段階である程度の織物表面の色彩を予測することができる。

Lambert-Beer の法則は本来透明な色フィルタや色ガラスを重ね合わせてつくる減法混色の際に用いられる方法である。物体からの分光反射率を $R(\lambda)$ とすると Lambert-Beer の法則における分光色濃度 $Dlb(\lambda)$ は式 3 より与えられる[5]。

$$Dlb(\lambda) = \log_{10} \left\{ \frac{1}{R(\lambda)} \right\} \quad (3)$$

同様に経糸の分光色濃度を $Dlb_{warp}(\lambda)$ 、緯糸の分光色濃度を $Dlb_{weft}(\lambda)$ 、織物表面における経糸の面積割合を S 、緯糸の面積割合を $(1-S)$ とすると混色後の、つまり交織織物の表面色の分光色濃度 $Dlb_F(\lambda)$ は式 4 で表される。

$$Dlb_F(\lambda) = S \cdot Dlb_{warp}(\lambda) + (1-S) \cdot Dlb_{weft}(\lambda) \quad (4)$$

2.2 糸間反射を考慮した色彩予測

式 2 および式 4 により算出される予測値は、互いの糸間で生じる反射を考慮していない。実際の織物中において反射の影響がある場合には、予測値と実測値との間に分光誤差 $\Delta D'(\lambda)$ が生じる。そこで経糸、緯糸の測定値よりその誤差を補正することを考える。ここで $\Delta D'(\lambda)$ と、経糸と緯糸の濃度差 $\Delta D_{yarn} = D_{warp}(\lambda) - D_{weft}(\lambda)$ は相関関係にあり、一次式で近似できるものと仮定する。実測値 $Dkm'(\lambda)$ 、 $Dlb'(\lambda)$ と式 2 および式 4 により求めた予測値 $Dkm_F(\lambda)$ 、 $Dlb_F(\lambda)$ の誤差 $\Delta Dkm'(\lambda)$ 、 $\Delta Dlb'(\lambda)$ と、経糸と緯糸の色濃度の差 $\Delta Dkm_{yarn}(\lambda)$ 、 $\Delta Dlb_{yarn}(\lambda)$ を求め、 $\Delta D'(\lambda)$ を目的変数、 $\Delta D_{yarn}(\lambda)$ を説明変数として式 5 の回帰式を得る。

$$\Delta D_c(\lambda) = a \cdot \Delta D_{yarn}(\lambda) + b \quad (5)$$

回帰係数 a と切片 b を決定し、 $\Delta Dkm_c(\lambda)$ 、 $\Delta Dlb_c(\lambda)$ を求める。この ΔD_c を式 6 に代入し、糸間反射の影響を考慮した予測値として $Dkm_c(\lambda)$ 、 $Dlb_c(\lambda)$ を求め、実測値 $Dkm'(\lambda)$ 、 $Dlb'(\lambda)$ と比較する。

$$\begin{aligned} D_c(\lambda) &= D_F(\lambda) - \Delta D_c(\lambda) \\ &= S \cdot D_{warp}(\lambda) + (1-S) \cdot D_{weft}(\lambda) - a \cdot \Delta D_{yarn}(\lambda) - b \end{aligned} \quad (6)$$

式 5 および式 6 中の a 、 b は実際の誤差 $\Delta D'(\lambda)$ を目的変数、経糸、緯糸の色濃度差 $\Delta D_{yarn}(\lambda)$ を説明変数として求めた回帰式の回帰係数と切片であり、色に依存しない定数とすることができれば、式 4 より糸の段階で精度よく織物表面の色彩を予測することができる。

3. 実験

3.1 実験装置および測定条件

糸色の測色を行い、減法混色理論を利用して表面色の予測を試みた。

接触方式の分光測色計(MINOLTA CM-2600d)を用いて測色を行い、色彩データソフト(コアサイエンス 彩チェック)により測色データの処理を行った。測色計の測定径を 8mm とし、光源は JIS Z 8781「CIE 測色用標準イルミナント」に従い、平均昼光を代表するものとして、CIE 測色用標準イルミナント D₆₅ を採用した。SCE(正反射光除去)、観察視野を 2° とし、10 カ所の平均値を測色値とした。

3.2 試料

試料は糸の段階で測色を行うために糸の試料と実際の織物表面を測色するために、その糸を用いて織った織物の試料を用意した。糸の試料は、ポリエステル白糸 w とポリエステルの染色糸、色は PCCS 色相環の 12 色相に

Table 1 Details of samples.

	color	yarn	yarn fineness (tex)	fabric density (cm ⁻¹)	surface ratio of warp
warp	w	polyester spun	29.5	24.5	0.48
	v2,v8,v12,v18	polyester filament	16.7	25.0	0.53
weft	v2,v4,v6,v8,v10,v12,v14,v16,v18,v20,v22,v24	polyester filament	16.7	22.5	—

Table 2 Measured value of sample yarns.

sample	Hue	Value	Chroma
w	4.18 Y	9.39	0.20
v2	7.49 R	4.84	18.99
v4	1.39 YR	6.66	16.52
v6	7.32 YR	6.95	16.13
v8	4.37 Y	8.60	10.89
v10	5.11 GY	6.07	9.72
v12	3.09 G	3.59	9.61
v14	3.11 B	3.64	8.32
v16	5.12 PB	2.92	10.25
v18	6.97 PB	2.37	11.89
v20	3.78 P	2.33	10.23
v22	5.49 P	2.36	14.37
v24	2.05 R	4.25	15.98

近い色として, v2, v4, v6, v8, v10, v12, v14, v16, v18, v20, v22, v24 の 12 色, 計 13 色の糸を用いた. 織物の試料は経糸に w, v2, v8, v12, v18 の 5 種, 緯糸に 12 色の染色糸を採用し, 計 60 種類の交織織物(斜子織)の試料をジャカード織機により作成した. 試料の詳細を表 1 に, 糸の測色値をマンセル表色系の Hue, Value, Chroma で表 2 に示す.

3.3 減法混色理論による色彩予測

上述した 13 色の糸をそれぞれ黒の植毛紙の上に隙間ができないように巻きつけて糸の試料を作成した. これらの測色を行い, 得られた分光反射率から式 1 および式 3 を用いて分光色濃度 $D_{km_warp}(\lambda)$, $D_{km_weft}(\lambda)$ および $D_{lb_warp}(\lambda)$, $D_{lb_weft}(\lambda)$ を得た. この色濃度と織物中の経糸の面積割合 S から式 2 および式 4 より織物表面色の予測値 $D_{km_F}(\lambda)$ および $D_{lb_F}(\lambda)$ を求めた.

次に, 黒の植毛紙の上に織物の試料を乗せて測色を行い, 得られた分光反射率から分光色濃度を算出し, 実測値の分光色濃度として $D_{km'}(\lambda)$ および $D_{lb'}(\lambda)$ を得た. 得られた予測値 $D_F(\lambda)$ と実測値 $D'(\lambda)$ を比較した.

3.4 糸間反射の影響を考慮した色彩予測

実測値 $D_{km'}(\lambda)$, $D_{lb'}(\lambda)$ と式 2 および式 4 により求めた予測値 $D_{km_F}(\lambda)$, $D_{lb_F}(\lambda)$ の誤差 $\Delta D_{km'}(\lambda)$, $\Delta D_{lb'}(\lambda)$ と, 経糸と緯糸の色濃度の差 $\Delta D_{km_yarn}(\lambda)$, $\Delta D_{lb_yarn}(\lambda)$ を求める. 式 5 の回帰式を考え, 回帰係数 a と切片 b を決定し, $\Delta D_{km_c}(\lambda)$, $\Delta D_{lb_c}(\lambda)$ を求める. この ΔD_c を式 6 に代入し, 糸間反射の影響を考慮した予測値として $D_{km_c}(\lambda)$, $D_{lb_c}(\lambda)$ を求め, 実測値 $D_{km'}(\lambda)$, $D_{lb'}(\lambda)$ と比較した.

4. 結果および考察

4.1 減法混色理論による予測の結果および考察

予測値 $D_F(\lambda)$ と実測値 $D'(\lambda)$ および経糸と緯糸の色濃度を比較した結果の例を図 1 に示す. 図 1 の (A) は経糸が v2, 緯糸が v14 の試料を Kubelka-Munk の法則により予測した結果, (B) は Lambert-Beer の法則により予測した結果である. 以後同様に, 織物試料を経糸と緯糸の組み合わせで「経糸の色-緯糸の色」のように表す. 図 1 からわかるように予測値と実測値の波形はほぼ一致するものの値には誤差が認められ, いずれの試料についても予測値の色濃度の方が実測値よりも高くなった.

図 1 から, 経糸と緯糸それぞれの色味を表す波長区域で実測値より予測値の方が色濃度が高いことがわかるが, これはつまり, 色味を表す波長区域で実測値より予測値の方が反射率が低いということであり, 実際の織物中で

(A) Kubelka-Munk's law (v2-v14)

(B) Lambert-Beer's law (v2-v14)

Fig. 1 Comparison of measured value $D'(\lambda)$, predicted value $D_F(\lambda)$, density of warp and weft.

は糸間反射によって互いの糸色の映り込みが生じていると考えられる。実測値と予測値とで差が生じたのもこの糸間反射の影響を考慮していないためだと考えられる。例えば図1をみると、経糸v2の色濃度曲線は波長が600nm付近から低くなっており、色味が赤の分光特性を示している。波長が600nm付近から、実測値 $D'(\lambda)$ の分光色濃度も予測値 $D_F(\lambda)$ に比べて経糸v2の分光色濃度よりになった結果から、隣接している緯糸に経糸の赤味が映り込んでいると考えられる。同様に、緯糸v14の色濃度曲線に着目してみると経糸に緯糸の色味が映り込んでいると考えられる。

4.2 糸間反射の影響を考慮した予測の結果と考察

次に予測値 $D_F(\lambda)$ と実測値 $D'(\lambda)$ との誤差 $\Delta D'(\lambda)$ を考える。図2に試料v2-v14の予測値と実測値との誤差 $\Delta D'(\lambda)$ 、糸色v2およびv14の分光色濃度 $D_{v2}(\lambda)$ 、 $D_{v14}(\lambda)$ とその濃度差 $\Delta D_{yarn\ v2-v14}(\lambda)$ を示す。ここでの濃度差は経糸の色濃度と緯糸の色濃度の差の絶対値である。

図2に示すように誤差 $\Delta D'(\lambda)$ と経糸、緯糸の色濃度差 $\Delta D_{yarn}(\lambda)$ の波形が似ていることに着目し、全ての試料について、互いの値の関係を調べた。試料v2-v14における両者の関係を図3に示す。全試料について予測値と実測値の間における実際の誤差 $\Delta D'(\lambda)$ と、経糸、緯糸の色濃度差 $\Delta D_{yarn}(\lambda)$ は直線で近似できることがわかった。その

(A) Kubelka-Munk's low (v2-v14)

(B) Lambert-Beer's low (v2-v14)

Fig. 2 Comparison of difference between measured value and predicted value $\Delta D'(\lambda)$ and difference between density of warp and density of weft $\Delta D_{yarn\ v2-v14}(\lambda)$.

相関係数の平均値は Kubelka-Munk の法則に従った場合 0.95, Lambert-Beer の法則に従った場合 0.80 であり、両者に比較的高い相関があることがわかった。これより、糸の段階で計測できる経糸、緯糸の色濃度差 $\Delta D_{yarn}(\lambda)$ を説明変量、実際の誤差 $\Delta D'(\lambda)$ を目的変量として回帰式を求め、回帰係数 a と切片 b を得た。全試料における a , b の値を図4に示す。図4からわかるように Kubelka-Munk の法則に従った場合、 a は色相によらずばらつきが小さいといえるが、 b は色相により値にばらつきがあった。一方、Lambert-Beer の法則に従った場合、 a および b は共に色相によらず値にばらつきが小さかった。よって Lambert-Beer の法則の場合には a , b の平均値を採用した。

さらに、特に経糸が白(w)の試料の場合の a , b は共にばらつきが少なかったので経糸が白(w)の試料の場合と経糸が有彩色(v2, v8, v12, v18)の試料の場合で分けて、平均値を採用した。その結果を表3に示す。Kubelka-Munk の法則の場合には試料ごとに実際得られた a , b を採用した。

式6より糸間反射の影響を考慮した予測値 $D_c(\lambda)$ を求め、実測値 $D'(\lambda)$ 、糸間反射の影響を考慮していない予測値 $D_F(\lambda)$ と比較した。その結果を図5に示す。

さらに、予測値 $D_c(\lambda)$ と実測値 $D'(\lambda)$ を逆変換して分光反射率 $R_{kmc}(\lambda)$, $R_{lb}(\lambda)$, $R'(\lambda)$ を求め、両者の理論による予測値と実測値を比較した結果を図6に示す。図6

(A) Kubelka-Munk's low

(B) Lambert-Beer's low

Fig. 3 Correlation chart of $\Delta D_{yarn}(\lambda)$ and $\Delta D'(\lambda)$ for v2-v14.

Table 3 Average value of a_{lb} and b_{lb} .

	warp w	weft v2,v8,v12,v18
a_{lb}	0.24	0.21
b_{lb}	-0.16	-0.03

Fig. 4 Values of partial regression coefficient a and intercept b by regression analysis.

(A) Kubelka-Munk's low (v2-v14)

(B) Lambert-Beer's low (v2-v14)

Fig. 5 Comparison of measured value $D'(\lambda)$, predicted value $D_F(\lambda)$, and predicted value with reflection effect $D_C(\lambda)$.

に示すように、いずれの試料についても、精度よく近似させることができた。糸間反射を考慮していない予測値よりも糸間反射を考慮した予測値の方が実測値との分光反射率は一致しており、糸間反射を考慮することで精度よく近似することができた。

また、Kubelka-Munk の法則より Lambert-Beer の法則に従った場合の色予測の方が精度よく予測できているという結果であった。濃度と反射率の関係は対数的な関係にあるので濃度が小さくなるにつれて反射率は指数関数的に高くなる。よって低い濃度での誤差ほど反射率に大きく影響することとなる。このことから低い濃度値を正確に予測することが重要であると考えられる。今回の比較の結果では Lambert-Beer の法則に従った場合の色予測の方が Kubelka-Munk の法則よりも低濃度での誤差が小さかったため、正確に予測できた。

Lambert-Beer の法則に従った場合の色予測では経糸が白(w)の試料においてはほぼ完全に近似されることができたが、経糸が有彩色(v2, v8, v12, v18)の場合はやや誤差の生じるものもあった。これは a , b の値を平均値として用いたこと、経糸、緯糸の隙間からわずかに見えていた下地の黒の植毛紙の色を考慮していないことなどによる結果だと思われる。

5. 結 言

織物を構成する糸の測色値と、織組織、織密度から求めた経糸と緯糸の面積割合を利用した、設計段階で可能な交織織物の表面の色彩予測について検討した。

Fig. 6 Comparison of measured value $R'(\lambda)$, predicted value $R_F(\lambda)$, and predicted value with reflection effect $R_C(\lambda)$.

織物表面の色彩は経糸と緯糸が減法混色されたものであるとして、Kubelka-Munkの法則とLambert-Beerの法則を利用して色彩予測を行った。

実際の織物中では糸に互いの糸色が映り込む糸間反射の影響があることが認められ、その糸間反射の影響を考慮するために、経糸、緯糸の色濃度差 $\Delta D_{\text{yarn}}(\lambda)$ を利用して補正を行うことで、糸の測定値から交織織物の表面色を精度よく予測することができた。また、Lambert-Beerの法則に従った色予測の方がより精度よく近似できた結果となった。しかも係数 a 、 b が定数として扱える結果となり、Kubelka-Munkの法則に従った色予測よりも汎用性のある予測式を提案することができた。

織物は立体構造をしており、見る角度により経糸、緯糸の面積割合が変化するので交織織物は色彩に異方性があるといえる。三次元形状の衣服などを設計する際やシミュレーションによる色彩評価を行う際などは、この異方性を考慮した色彩予測モデルが必要である。今後、色や織り方の異なるより多くの試料を用い、異方性も考慮した測定、予測の検討を行うことで、より汎用性のある予測モデルが構築できるものと考えられる。

本研究は文部科学省 21 世紀 COE プログラムならびに科学研究費補助金、基盤研究(C) 16500124 の助成を受けた。また、試料を提供して下さった福井県工業技術センター村上哲彦氏に感謝申し上げます。

文 献

1. M. Tanaka, K. Kosaku, *Sen'i Kikai Gakkaishi*, **11**, 246 (1958).
2. T. Tuboi, K. Nihira, T. Gunji, *Sen'i Kikai Gakkaishi*, **26**, 103 (1973).
3. T. Tuboi, K. Nihira, T. Gunji, *Sen'i Kikai Gakkaishi*, **27**, 118 (1974).
4. T. Tuboi, K. Nihira, T. Gunji, *Sen'i Kikai Gakkaishi*, **34**, 259 (1981).
5. Tokyo Daigaku Syuppankai, "*Handbook of Color Science, Second Edition*", Nihon Shikisai Gakkai, p.567-568, p. 562 (1998).