平織物の光透過異方性

信州大学繊維学部 矢崎美彦・高寺政行・清水義雄

Anisotropic Light Transmission Properties of Plain Woven Fabrics

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: Light transmission property of plain woven fabrics was studied in order to perform the fabric design considering the transmission. A light transmission measurement apparatus which could change incidence and receiving direction of light was developed and the change of the transmission factor by light direction was measured for plain woven fabrics. Because structures of the fabrics are anisotropy, the light transmission property showed anisotropy. The anisotropy of transmission factor was remarkable in large incidence angle, and the minimum or maximum values were showed every $\pi/4$ cycle. An approximation curve of anisotropy was proposed and the anisotropic light transmission factor was estimated from a measurement at front of a fabric and structure of the fabric based on crimp theory of Peirce.

(Received 9 December, 2003; Accepted 1 July, 2004)

1. 緒 言

衣服の透けは、肌の色を透かしたり重ね着の透け効果を目的とするファッション性の観点からも、光のコントロールという機能性からも重要な因子である。

衣服の透け具合を設計段階において意図的に変化させるためには、衣服を構成する織物の光学的特性（透過、反射、吸収）を考慮しなければならない。織物の光反射特性や光沢に関しては沢路[1]、稲垣ら[2]、成瀬ら[3]の研究を始め数多くの報告がある。しかし、反射特性だけでは肌や下に着ている衣服の透け具合を評価することはできない。肌や下の衣服の透けは、上に着ている衣服を光が透過し肌や下の衣服に反射し、再び上の衣服を透過して見える。よって、織物の光透過性を考える必要がある。織物は、主にその構造とそれを構成する糸の違いにより光透過率が異なる。織密度や糸の太さにより糸間の隙間である空隙部の面積は変化し、糸自体の光透過率が大きければ布としての光透過率も当然大きくなるからである。古島[4]は薄地の布の透明度を光の透過性として分解視力に置きかえた評価を、吉野ら[5]は衣服内にある膚と下着の色や境目の透け具合と、空間や脚の内腿に囲まれた部分の透け具合に関する研究を報告している。また、軍司ら[6]、稲垣ら [7]により糸の形状や特性などにより糸自体の光透過性が異なることが報告されている。なお、編物の光透過性については松本ら[8]の報告がある。

織物は立体構造であるから方向により見かけの空隙部

の面積が異なる。よって織物に対する光の入射方向により光透過性にも異方性があることが考えられる。しかし、これまでの研究では布や糸の光反射特性に異方性があることは報告されているが[1,9]、異方性を考慮した布の光透過性の評価はされていない。特に三次元形状の衣服や布のシミュレーションにより、その視覚効果の評価を行なう際には、異方性を考慮した光透過モデルが必要である。織物は経糸、緯糸の交錯の仕方により複雑で様々な立体構造を形成することができる。なかでも平織物は最も単純な構造で薄地のものが作れる特徴があるため、透けることを意図とした織物に主として用いられる。

本研究では平織物の構造と光透過性との関係を明らかにするため、平織物の光透過性の異方性測定を行ない、その構造から光透過異方性を予測することを目的とした。

2. 理 論

2.1 光透過異方性

本研究において、光透過性とは入射する光を織物がどれだけ通すかということであり、これを透過光の強度と入射光の強度との比である光透過率で評価した。入射光の照度を $I_i(\text{lm}/\text{m}^2)$ 、透過光の照度を $I_t(\text{lm}/\text{m}^2)$ とすると、光透過率 $T(\%)$ は式 1 のようになる。

$$T = \frac{I_t}{I_i} \times 100 \quad (1)$$

織物に光が当たった場合、その入射光は主に次の 4 つに分

けられると考えられる (図1)。

- L_A 空隙透過光 : 糸間の隙間を透過する光
- L_B 糸透過光 : 糸の内部を透過する光
- L_C 反射, 拡散光 : 糸の表面で反射, 拡散する光
- L_D 吸収光 : 糸の内部に吸収される光

この内, 空隙透過光と糸透過光を合わせたものが織物の透過光である。また, 光透過異方性とは光の入射方向の違いにより光透過率が異なることである。図2に示すように織物平面を X-Y 平面とすると, 試料に対する光の入射方向は, 方位角(β)方向と仰角(α)方向の2つの角度により決まる。 α はZ軸からの角度, β はX軸から左回りの角度である。

Fig. 1 Incident direction of light.

Fig. 2 Courses of light.

この2つの角度の変化にともない, 主として光 L_A , L_B が変化するため異方性が現れる。平織物の場合は構造が上下, 左右対称と仮定すると, 異方性にも対称性があることが考えられる。よって, 任意の α に対する光透過率 $T_{\alpha, \beta}$ は式2のような $\pi/2$ 周期の曲線で近似できる可能性がある。

$$T_{\alpha, \beta} = A \cos^4 \beta + B \sin^2 \beta \cos^2 \beta + C \sin^4 \beta \quad (2)$$

係数 A は $\beta=0^\circ$, C は $\beta=90^\circ$ における光透過率である。また, B は β のどこか1ヶ所における光透過率を用いて求められる。よって, 式2が成立するとき $\beta=0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ の光透過率が分かれば異方性を近似できる。

2.2 クリンプモデルによる光透過異方性の予測

式2の係数 A, B, C は測定で求めることができるが, 織物の構造から推定できないかと考えた。先に述べたように, 織物の透過光は空隙透過光と糸透過光の2つである。

よって, α の変化によるそれぞれの光の変化を考えることにより, 光透過異方性が予測できると考えられる。

2.2.1 空隙透過光の変化

図1の空隙透過光の透過率は, 織物の面積に対する空隙の割合である。 α, β の変化により正投影した空隙, すなわち見かけの空隙が変化する。そこで, 織物の構造から $\beta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ における α の変化による見かけの空隙率の変化を計算した。

透け具合の良い比較的粗く織られた織物では, 糸の潰れは少なく糸断面はほぼ円形であるので, 平織物の構造モデルとして図3に示す Peirce のクリンプモデル[10]を用いた。

Fig. 3 Crimp theory of Peirce.

ここで,

d : 糸の直径

p : 糸間の距離 (糸密度の逆数)

θ : 布の中心面に対してなす糸軸の最大傾角

l : 隣接する交錯糸間の糸軸の長さ

h : 糸軸曲線の布面の中心からの最大変位 (波高)

c : 糸のクリンプ

D : 経糸と緯糸の直径の和 ($d_1 + d_2$)

添え字 1, 2 はそれぞれ経糸, 緯糸に対応する。

(a) $\beta=0^\circ$ および 90° のとき

$\beta=0^\circ$ のとき α の変化による見かけの空隙は図4(a)のように変化する。 α の変化に伴う見かけの空隙部を台形とみなし, 上底を a , 下底を b , 高さを H_1 とすると

$$a = \{p_1 - (p_2 - d_2) \tan \theta_1 \tan \alpha\} \cos \alpha - d_1 \quad (3)$$

$$b = \{p_1 + (p_2 - d_2) \tan \theta_1 \tan \alpha\} \cos \alpha - d_1 \quad (4)$$

$$H_1 = p_2 - d_2 \quad (5)$$

となる。

$a \geq 0$ のとき, 見かけの空隙の面積 s は次のようになる。

$$S = \frac{1}{2} (a + b) H_1 = (p_1 \cos \alpha - d_1) (p_2 - d_2) \quad (6)$$

これを展開すると

$$S = p_1 p_2 \cos \alpha - d_1 p_2 - d_2 p_1 \cos \alpha + d_1 d_2 \quad (7)$$

ここで,

$p_1 p_2 \cos \alpha$: 織物の総面積 $d_2 p_1 \cos \alpha$: 緯糸部の面積

$d_1 p_2$: 経糸部の面積 $d_1 d_2$: 経糸, 緯糸の交錯部の面積となり, 織物の総面積から糸部の面積を引いた値と一致する。

$a \leq 0$ のとき見かけの空隙を三角形とみなすと, その高さ H_2 は

$$H_2 = \frac{bH_1}{(|a|+b)} = \frac{bH_1}{(b-a)} \quad (8)$$

$$= \frac{\{p_1 + (p_2 - d_2)\tan\theta_1 \tan\alpha\}\cos\alpha - d_1}{2\tan\theta_1 \sin\alpha}$$

となり、見かけの空隙の面積 S は次のように求まる。

$$S = \frac{1}{2}bH_2 = \frac{[\{p_1 + (p_2 - d_2)\tan\theta_1 \tan\alpha\}\cos\alpha - d_1]^2}{4\tan\theta_1 \cos\alpha} \quad (9)$$

よって、任意の α に対する見かけの空隙率 $O_{\alpha,0}$ は

$$O_{\alpha,0} = \frac{S}{p_1 p_2 \cos\alpha} \quad (10)$$

$b \leq 0$ になると見かけの空隙はなくなる。

$\beta = 90^\circ$ における見かけの空隙率 $O_{\alpha,90}$ は経糸と緯糸が逆になるだけで、同様に求められる。

(b) $\beta = 45^\circ$ のとき

$\beta = 45^\circ$ のとき α の変化による見かけの空隙は図 4(b)に示すように複雑な形で変化する。そこで、見かけの空隙部の面積 S を式 7 と同様に織物の総面積から糸部の面積を引いた値とし求めた。 α の変化による p_1 , p_2 の見かけの長さは p'_1 , p'_2 次のようになる。

$$p'_1 = \sqrt{(p_1 \sin 45^\circ)^2 + (p_1 \cos 45^\circ \cos\alpha)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}p_1^2(1 + \cos^2\alpha)}$$

$$p'_2 = \sqrt{(p_2 \sin 45^\circ)^2 + (p_2 \cos 45^\circ \cos\alpha)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}p_2^2(1 + \cos^2\alpha)} \quad (11)$$

よって、経糸、緯糸部の面積は

$$d_1 p'_2 = d_1 \sqrt{\frac{1}{2}p_2^2(1 + \cos^2\alpha)}$$

$$d_2 p'_1 = d_2 \sqrt{\frac{1}{2}p_1^2(1 + \cos^2\alpha)} \quad (12)$$

となり、任意の α に対する見かけの空隙率 $O_{\alpha,45}$ は式 10 と同様に

$$S = p_1 p_2 \cos\alpha - d_1 \sqrt{\frac{1}{2}p_2^2(1 + \cos^2\alpha)} - d_2 \sqrt{\frac{1}{2}p_1^2(1 + \cos^2\alpha)} + d_1 d_2 \quad (13)$$

と求まる。ただし、この式は糸密度、糸の太さ、クリンプ率が小さく、 α が大きくなっても糸と糸との重なりがあまりない場合のみ有用である。

2.2.2 糸透過光の変化

経糸、緯糸が同一素材の場合、図 1 の光 L_B である糸の内部を透過する光、すなわち糸自体の光透過率 $T_{Y0,0}$ の α による変化は次のように考えられる。

14 式のように、織物の正面 ($\alpha, \beta = 0^\circ$) から光を照射したときの透過率 $T_{0,0}$ から式 10 で求めた空隙率 $O_{0,0}$ を引く。

$$T_{Y0,0} = T_{0,0} - O_{0,0} \quad (14)$$

(a) $\beta = 0^\circ$ および 90° のとき

$\beta = 0^\circ$ のとき、任意の α における糸の光透過率 $T_{Y\alpha,0}$ は次のように考えられる。経糸と緯糸とが重なる部分では光

の透過は少ないと考え無視し、図 4(a)の H_1 , a , b の部分で光の透過があるものとする。よって α の変化に伴う H_1 , a , b の割合で $T_{Y0,0}$ が変化するので式 15 のように考えられる。

$$T_{Y\alpha,0} = \frac{H_1 + a + b}{H_1 + 2(p_1 - d_1)} T_{Y0,0} \quad (15)$$

$\beta = 90^\circ$ のときは経糸と緯糸が逆になるので

$$T_{Y\alpha,90} = \frac{H_1 + a + b}{H_1 + 2(p_2 - d_2)} T_{Y0,0} \quad (16)$$

となる。

(b) $\beta = 45^\circ$ のとき

$\beta = 45^\circ$ のとき、任意の α における糸の光透過率 $T_{Y\alpha,45}$ は次のように考えられる。 $\beta = 45^\circ$ のときは図 4(b)のように α が変化しても、経糸と緯糸の重なりがあまりないものとし、式 17 のように一定とする。

$$T_{Y\alpha,45} = T_{Y0,0} \quad (17)$$

2.3 平織物の光透過率理論値

以上のことから、 $\beta = 0^\circ$, 90° , 45° における任意の α に対する光透過率 $T_{\alpha,0}$, $T_{\alpha,90}$, $T_{\alpha,45}$ は式 10 と式 15~17 の和になる。

$$T_{\alpha,0} = O_{\alpha,0} + T_{Y\alpha,0} \quad (23)$$

$$T_{\alpha,90} = O_{\alpha,90} + T_{Y\alpha,90} \quad (24)$$

$$T_{\alpha,45} = O_{\alpha,45} + T_{Y\alpha,45} \quad (25)$$

$T_{\alpha,0}$ と $T_{\alpha,90}$ は、それぞれ式 2 の係数 A と C に対応する。

また、 $T_{\alpha,45}$ を式 2 に代入すると

$$T_{\alpha,45} = A \cos^4 45^\circ + B \sin^2 45^\circ \cos^2 45^\circ + C \sin^4 45^\circ$$

$$B = \frac{T_{\alpha,45} - A \cos^4 45^\circ - C \sin^4 45^\circ}{\sin^2 45^\circ \cos^2 45^\circ} \quad (26)$$

となり係数 B が求まる。

よって、経糸、緯糸が同一素材で織られた平織物の場合、式 14 に必要な $T_{0,0}$ を測定するだけで、その構造から光透過率の異方性を求めることができる。

Fig. 4 Change of the space of fabric.

3. 実験

3.1 実験装置

光の入射角 α と β を変化させ透過光量を測定するために、測定装置を作製した。図 5 に装置の概略を示す。透けに関する試験方法としては、JIS L 1055「カーテンの遮光性試験方法」があり一部参考にした。試料に光を当て透過した光量を照度計で測定する。回転台 1 に光源と照度計が一直線上に取付けられており、これらが回転することにより図 2 の α が変化する。試料は回転台 2 に取付けこれが回転することにより β が変化する。この二つの回転により異方性の測定が行なえる。 α は試料平面に垂直な方向、図 1 では Z 軸を $\alpha=0^\circ$ とし試料に向かって左回転を正とした。また、 β は緯糸が図 1 の X 軸上のときを $\beta=0^\circ$ とし、左回転を正とした。回転台はステッピングモータにより、回転角および回転速度が制御できる。また、 α 、 β の変位はレーザ変位計により検出する。光源はハロゲン球 12W、照度計は TOPCON IM-3 AA 級を使用した。測定時は外部からの光の影響を避けるために、装置を暗幕で覆う。なお、光源と試料間の距離は 200mm、照度計と試料間の距離は 100mm、光透過部は直径 100mm の円形とした。

3.2 試料

実験には正面での空隙率の異なるものとして、緯糸密度の異なるポリエステル平織物（ジョーゼット）5 種類と、空隙率の大きい市販の平織物 3 種類を用いた。試料の詳細を表 1 に示す。糸の直径は Micro CCD Scope で拡大画像を撮り、画像を二値化し求めた。クリンプ率、厚さは JIS L 1079 に基づき測定した。試料は、装置に取付けやすくするために、130mm×130mm の大きさのものを 200mm×200mm で中央に長径 100mm の穴をあけた画用紙に貼りつけた。

3.3 測定方法

異方性測定における二方向の角度 α 、 β が光透過性におよぼす影響をそれぞれ検討するため、二通りの測定を行なった。

(1) 測定 1（ α 変化法）

α の変化に伴う異方性を測定する方法として、次の測定を行なった。 β を $0^\circ \sim +90^\circ$ まで 15° おきに回転させる。それぞれの β において、 α を $0^\circ \sim +60^\circ$ まで自動回転させながら透過光の照度を約 0.2° 間隔で測定し、移動平均（5 点）によりノイズを除いた。

(2) 測定 2（ β 変化法）

β の変化に伴う異方性を測定する方法として、次の測定を行なった。 α を $0^\circ \sim +60^\circ$ まで 15° おきに回転させる。それぞれの α において、 β を $0^\circ \sim +360^\circ$ まで自動回転させながら透過光の照度を約 1° 間隔で測定し、移動平均（5 点）よりノイズを除いた。

測定 1、2 ともに試料無装着時の照度を測定し、これを I_1 とし、式 1 に代入し透過率を求めた。

Fig. 5 Measurement device.

Table 1 Details of samples.

sample name	fiber	yarn density (threads/cm)		yarn count (tex)		diameter (mm)		crimp (%)	thickness (mm)
		warp	Weft	warp	weft	warp	weft	warp	
G1	polyester		24.4			0.107	0.107	6.8	0.28
G2			31.1			0.107	0.107	12.3	0.29
G3		39.8	34.6	8.3	8.3	0.107	0.108	12.1	0.27
G4			38.6			0.108	0.108	10.3	0.25
G5			42.5			0.107	0.107	9.0	0.25
N	nylon	43.9	35.2	4.3	4.2	0.061	0.061	6.6	0.11
P1	polyester	31.2	38.4	9.6	9.7	0.108	0.106	6.1	0.13
P2	polyester	25.6	33.5	21.7	12.8	0.177	0.140	10.6	0.19

4. 結果および考察

4.1 光透過率の変化

始めに、ポリエステルジョーゼット (G1~G5) の結果について述べる。図6に試料G1の α の変化に対する光透過率を示す。この図からわかるように、 α が大きくなるにつれ光透過率は減少する。これは、 α の変化により見かけの空隙率が変化するためであり当然の結果である。また、 α が大きくなるにつれ光透過率に異方性が現れた。これは、G2~G5についても同様であった。しかし、この異方性は緯糸密度が小さいほど、すなわち緯糸と経糸の密度差が大きいほど α が小さい段階から現れた。これは、緯糸密度が小さいと空隙が縦長の長方形になり、 β が 0° のときと 90° のときで見かけの空隙の変化が異なるからである。図7に、異方性が顕著に表れた $\alpha=60^\circ$ における緯糸密度の違いによる光透過率の異方性を示す。この図からわかるように、その変化は2.1で述べたように、 $\pi/2$ 周期の曲線となった。

市販の試料 (N, P1, P2) についても、ジョーゼットと同様に、 α が大きくなるにつれ $\pi/2$ 周期の異方性が現れる結果となった。

Fig. 6 Light transmission factor for a change of α (G1).

Fig.7 Anisotropy of light transmission factor at $\alpha=60^\circ$.

4.2 測定値と近似値および理論値との比較

各試料について、Peirceのクリンプ理論に必要な4つのパラメータ p_1 , p_2 , c_1 , D の測定値をもとに、式18~20の理論値を求めた。図8に、G1とG5の α の変化に対する光透過率の測定値と理論値との比較を示す。この図からわかるように、緯糸密度が小さい試料では測定値と理論値がほぼ一致したが、密度の大きい試料では一致しなかった。

図9に $\alpha=60^\circ$ における β 方向の透過率の測定値と、 $\beta=0^\circ$, 45° , 90° の測定値を式2に代入して求めた近似値および、式18~20の計算値を式2に代入して求めた理論値を示す。各試料とも、測定値と近似値はほぼ一致した。理論値もG5とP2以外は比較的、測定値と一致した。G5やP2は、糸の潰れが大きく試料の構造が実際はクリンプモデルになっていないため、測定値と理論値が一致しなかったものと思われる。

以上の結果から、平織物の光透過異方性は、 $\beta=0^\circ$, 45° , 90° の3ヶ所の測定値より近似できる。また、比較的粗く織られた糸の潰れが少ない平織物では、クリンプモデルに必要な織物の4つのパラメータと正面 ($\alpha=\beta=0^\circ$) から光を入射したときの透過率を測定することにより、光透過異方性を求めることができる。

G1

G5

Fig. 8 Comparison between measured and theoretical values of light transmission factor.

Fig.9 Comparison of measured , approximated and theoretical values of light transmission factor at $\alpha=60^\circ$.

5. 結 言

平織物の光透過性の異方性測定を行ない、構造との関係を検討した。測定の結果、平織物では光の入射方向（ α 方向）が大きくなると異方性が表れ、経糸と緯糸の違いが大きい織物で顕著な異方性が見られた。また、異方性は $\pi/4$ 周期で極値が表れた。よって、3ヶ所の透過率を測定するか、Peirce のクリンプモデルによる織物の幾何学的構造と、織物の正面から光を照射したときの透過率を測定することにより、光透過異方性を推定することができた。

今後、より多くの試料について測定を行なう必要があるが、糸の潰れが少なく、比較的粗く製織された織物（空隙の大きな織物）に関しては本研究の理論が有用である。

本研究は 21 世紀 COE の補助を受けた。

文 献

1. M. Sawaji, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **11**, 615 (1970).
2. K. Inagaki, N. Akagawa, *Sen'i Gakkaishi*, **27**, 301 (1971).
3. N. Naruse, H. Igarashi, K. Nihira, *Sen'i Gakkaishi*, **33**, 444 (1977).
4. T. Furushima, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **26**, 291 (1985).

5. S. Yoshino, J. Akashi, T. Yamanaka, E. Horita, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **41**, 682 (2000).
6. T. Gunji, K. Nihira, T. Tsuboi, *Sen'i Kikai Gakkaishi*, **24**, 149 (1971).
7. K. Inagaki, N. Akagawa, *Sen'i Gakkaishi*, **25**, 207 (1969).
8. Y. Matsumoto, H. Morooka, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **38**, 711 (1997).
9. M. Sato, W. Lee, *Sen'i Gakkaishi*, **56**, 323 (2000).
10. Kiso Senni Kogaku hennsyu Innkai "Kiso Senni Kogaku III" Nihon Sen'i Kikai Gakkai p.36-38 (1967).