

## 染色布の分光反射と色度変化

Spectral Reflection Factor and Color Appearance of Surface of Dyed Woven Cloths

坂上ちえ子

SAKAGAMI Chieko

(Received October 1st, 2009)

### Summary

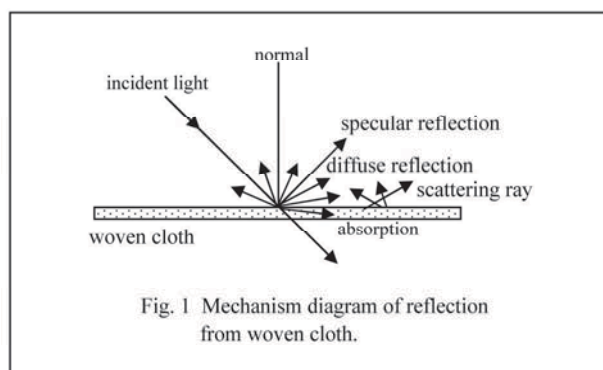
Surface reflection characters of woven cloths were investigated in this study. Ten types of cloth made of different fabric and fiber material were selected as experiment samples and they were dyed to four types of colors (i.e. red, green, yellow, and blue). Using a goniospectrophotometer model GCM-4, which was produced by Murakami Color Laboratory Co. Ltd., the spectral reflection factor of forty types of experiment sample were measured at an incident angle of 45°. And at five specular angles of 0°, 15°, 30°, 45° and 60°, the CIE luminance factor and the chromaticity coordination of forty types of experiment sample were calculated from these measurement results. The spectral reflectance, the chromaticity and the lightness of forty types of experiment sample were increased by receiving angle at condition of 45° of incident. And the specular reflection factor from surface of woven cloths could not be obtained but indicates that the diffuse reflection factor and the scattering ray from surface would cause an increasing of score. As these results, it was supposed that the optical properties of woven cloths should be influenced by geometrical surface structure of fabrics.

*Key words: surface reflection character; woven cloths; specular reflection factor; diffuse reflection factor*

### 1. はじめに

布は金属やプラスチックとは異なる独特の質感を持つとされるが、布表面への入射光に関わる物理現象が複雑であることにその原因がある。複雑さの背景要因として、繊維が透明物質であるために透過や吸収といった反射以外の現象が起こることや、繊維の断面形状や布を構成する織り構造によって反射に異方性が生じることなどが挙げられる(図1)。これまでも織物表面の反射の一部を解明する研究はあったが、これらの現象全体を理解できるものではなかった。

これまでの表面反射に関する先行研究では、CG表現のための反射モデル解明について多くの研究が行われてきた。おもに、2色性反射モデルを用いて布の反射光の解明を試みた研究である。これは、布の反射光を鏡面反射成分(完全鏡面ではなく光沢反射と言われる粗い面の鏡面反射)と拡散反射成分(ランバート法則の完全拡散反射)の2つの加法成分とする考え方が基になっている[1-3]。CG表現では簡素なモデルを用いた光反射の厳密な記述が求められており、2色性反射モデルは様々な物体の表現に妥当だとされている。その考えを応用して、2色性反射モデルを用いて布



の反射成分の解明を試みる研究が続いているが、このモデルでは布の正確な記述は困難であるとの結果も見られる [4]。CG作成には、数多くのパラメータを含む複雑なモデルは実用的でないが、布の反射をモデル化するための反射成分が2つでは不充分であるため、布を構成する繊維や構造の特色を正確に反映し、織物表面の反射特性に合ったモデルパラメータを推定するための研究が行なわれている。

それは、布からの反射光を正反射光と内部反射光、拡散反射光の3種類に分類した研究と、その結果を基に布のCGレンダリングを試みた一連の研究群である。これは、最初に稲垣らが布の光沢とその質感を解明するために行なった布の反射光を3種類に分類する研究を出発点に、安田らがその結果を布のCGレンダリングに取り入れたものである [5-6]。正反射光を方向性のある鋭い光（金属のハイライトに対応）、内部反射光を布固有の反射光、拡散反射光は通常の拡散反射光と解釈し、布の反射モデル [7] を導いたが、織目構造や断面形状などの影響は考慮されておらず、不完全な部分を補完するための実験研究が続いている [8-10]。

布に限らず物体表面に入射した光は、大きく分ければ、反射、吸収、透過という物理現象を経る。そして、その中の反射現象だけを分類しても、表層からの鏡面反射・拡散反射、内部を通過しての鏡面反射・拡散反射、入射点以外からの拡散反射、さらに、表面での相互反射も起こるとされるなど、布ではそれを構成する繊維や織り構造が原因で特に反射が複雑であるとされている。

しかし、先に紹介した先行研究では反射光量が微量な成分を除き、反射光を2ないし3に分離測定し、CG製作に必要なと考えられる反射特性のみを捉えている。表面の相互反射といった布の見え方を特徴付けると予測される反射機構を解析するに至っていない。また、布の反射特性を抽出し易いよう、測定にはプラスチックの表面に似た光沢を表出するポリエステル100%のサテン生地が用いられ、日常生活では目にする機会の少ない特殊な布が研究対象にされている。加えて、布の色の見え方を検討した研究は見当たらない。

今回の実験では、これまでの研究で用いられた光沢の強い布ではなく、普段使用されることの多い布を対象に、受光角度を変化させてその分光反射率を測定することで、従来考えられてきた鏡面反射と拡散反射の2成分のみで独特の質感を認知させる布表面の反射を説明できるかを確認する。

さらに、得られた分光反射率から色度を求め、観測角度が異なれば布の色がどのように違って見えるのかについても明らかにする。

## 2. 方法

### 2. 1. 試料

測定に用いた試料布は一般に多用されている繊維や織り組織を選択し、変化織やラメなどを用いた特殊素材は省いた。シルケット加工した綿の平織り布 (sample A, 以下, Aと記す), シルケット未加工の綿平織り布 (B), シルケット加工した綿の綾織り布 (C), 綿の朱子織り布 (D), シルケット加工した綿ニット布 (E), シルケット未加工の綿ニット布 (F), 絹の平織り布 (G), 毛の平織り布 (H), 麻の平織り布 (I), レーヨンの平織り布 (J) の10種類である。その詳細は表1に示す。

Table 1 Details of 10 experiment samples.

sample label	fiber material	woven	density	thickness
		pattern	(warp×woof/inch)	(mm)
A	cotton(silket)	plain	130×70	0.22
B	cotton	plain	130×70	0.22
C	cotton(silket)	twill	114×54	0.45
D	cotton	satain	84×130	0.28
E	cotton(silket)	knitting	39×43	0.58
F	cotton	knitting	39×43	0.75
G	silk	plain	135×98	0.12
H	wool	plain	69×58	0.32
I	linen	plain	52×56	0.24
J	rayon	plain	106×74	0.12

これらの試料布は原布(未染色布)であるため、それぞれ、赤(r), 緑(g), 黄(y), 青(b)に染色した。よって、試料布は合計40となった。染料は2種類で、試料布GとHは動物繊維であるため酸性染料(商品名:ラナセット)を用い、他の試料布は植物繊維あるいは植物由来繊維であるため反応染料(商品名:リアック)で染色した。2種類の染料では、それぞれ用いる助剤や染色の条件・手順は異なるが、同じ染料を用いる場合は、試料布や染色する色が異なっても染料や助剤の割合、条件・手順は同一とした。それらの染色条件は表2に示す。

Table 2 Dyeing conditions used in this experiment. Each ratio is estimated by O.W.F (on the weight of fiber) in this table.

sample label	reactive dye				acid dye					
	A	B	C	D	E	F	I	J	G	H
dyeing color	red	green	yellow	blue	red	green	yellow	blue		
dye concentration	5%				3.6%					
dyeing auxiliaries	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (150%) Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (60%)				NaCl(30%) HCOOH(2%)					
dyebath ratio	1:30				1:50					
dyeing method	dip dyeing				dip dyeing					

また染色した各試料の表色測定結果（JIS規定条件下 [45度照射/0度受光方式]）は表3に示す通りである。前述の通り、同一染料の場合は助剤の割合や条件・手順を統一したが、試料布の繊維や織り方の違いで染着量は異なってくる。そのため、染色した同一色間で10種の試料布のL\*a\*b\*表色系測定値を比較すると大きな色差は無いが全くの同値ではない。これは先に目的で示したように、染色した各同一試料布について観測角度を違えた場合の測定結果を検討する実験であるため、表3の色差は問題とされない。

Table 3 Values of CIEL\*a\*b\* chromatic coordinates of 40 experiment samples determined by D65 illuminant-2° and JIS [45/0] standard observer.

sample label	dyeing color	L*	a*	b*	sample label	dyeing color	L*	a*	b*
A	red	51.98	56.66	21.56	F	red	52.31	56.86	20.84
A	green	65.09	-49.78	11.16	F	green	66.41	-50.43	18.2
A	yellow	83.45	-2.96	74.67	F	yellow	85	1.6	79.35
A	blue	34.75	9.9	-32.96	F	blue	35.89	8.05	-31.87
B	red	53.12	54.2	20.5	G	red	56.34	55.9	21.01
B	green	65.78	-47.27	13.44	G	green	49.24	-27.06	-9.63
B	yellow	82.89	-3.51	66.49	G	yellow	90.75	-11.26	88.37
B	blue	38.49	7.2	-31.1	G	blue	43.37	14.15	-49.39
C	red	53.22	61.91	25.44	H	red	39.29	52.24	27.26
C	green	65.83	-56.9	14.58	H	green	30.67	-18.63	-7.1
C	yellow	88.79	-1.08	83.31	H	yellow	76.86	-5.66	86.33
C	blue	34.6	11.46	-35.88	H	blue	26.55	21.12	-44.96
D	red	55.02	65.68	31.23	I	red	55.84	53.19	22.17
D	green	65.7	-64.82	14.5	I	green	67.38	-50.12	14.85
D	yellow	92.84	0.66	93.82	I	yellow	83.99	-3.58	69.28
D	blue	32.83	13.94	-35.54	I	blue	40.4	8.53	-29.5
E	red	49.37	61.18	27.26	J	red	39.66	54.4	31.37
E	green	61.24	-56.72	9.63	J	green	55.34	-57.88	19.31
E	yellow	85.6	2.7	88.77	J	yellow	71.76	6.12	83.51
E	blue	29.77	12.4	-34.77	J	blue	22.31	11.6	-24.14

## 2.2. 計測方法

計測には変角分光測色システム（変角分光測色システム GCM-4 型（株村上色彩研究所製）を用いた。この機器は光源からの照射角度と計測部が受光する角度を三次元的に変化させながら、物体からの反射光の分光分布を計測できるものである。今回の測定では、静岡県工業技術研究所の機器を借用した。

上記計測機器への試料布の固定方法は、入射光軸と試料布法線を含む入射面に試料布の経糸が平行となるよう設置した。これは通常人が布を目にする状況、つまり、経方向に置いた布を人が見ている状態と同じであることから、基準の設置方向とし、以下、経方向と記す。試料の固定方法には他に、基準の設置を45度面内回転させた方向と90度回転させた方向の2種類を設定した。前者はバイアス方向、後者は緯方向に置いた布を人が見ている状態と同じであることから、以下、それぞれを斜方向、経方向と記す。

光源の入射角度は、試料面の法線に対して45度入射とした。受光角度は、0度、15度、30度、45度、60度に変角させ、D65光源-2度視野の条件で試料布の分光反射率測定を行った。

### 2.3. 解析方法

既述の変角分光測色システムで計測した試料布の分光反射率は、人が布を見て知覚する色そのまま提示するものではない。観測方向によって人がどのように布の色を知覚しているかを検討するためには、計測した試料布の分光反射率から2度視野XYZ表色系（CIE 1931表色系）の色度座標に変換する必要がある。まず、色度座標 $x, y, z$ を求めるために、反射による物体色の三刺激値 $X, Y, Z$ を次式によって求める。

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots(1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots(2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots(3)$$

$$K = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots(4)$$

$S(\lambda)$  : 標準光の分光分布

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  : XYZ表色系における等色関数

$R(\lambda)$  : 分光立体角反射率

既知であるD 65光源の分光分布と等色関数、変角分光測色システムによって測定した $R(\lambda)$ によって三刺激値 $X, Y, Z$ を算出する。さらに、その $X, Y, Z$ から次式によって色度座標 $x, y, z$ を求める。

$$x = X / X + Y + Z \quad \dots\dots(5)$$

$$y = Y / X + Y + Z \quad \dots\dots(6)$$

$$z = Z / X + Y + Z = 1 - x - y \quad \dots\dots(7)$$

## 3. 結果と考察

### 3.1. 分光反射率

図2-1から2-4に、赤(r)に染色した試料布Aの経方向における受光角度ごとの分光反射率結果を示す。10種の試料原布では繊維や織りの種類が異なるため、分光反射率の結果も異なるが、共通する結果もあった。まず、一つ目の共通点として、受光角度が法線方向（受光角度0度）から離れるほど、分光反射率も高くなったことが挙げられる。金属やプラスチックのように光沢があり表面が平滑な試料であれば、正反射方向への反射光量が最大になるため、分光反射率も試料の色や反射の波長に関わらず、正反射方向に一致する受光角度（45度）での反射率が最も高

くなると考えられる。比較のために測定機器や測定条件を40試料布と同様にして測定した赤の紙製色票（株日本色研事業製）の分光反射率の測定結果を図3-1と3-2に示す。測定した紙製色票の $L^*a^*b^*$ は、JIS規定条件下[45度照射/0度受光方式]で、 $L^*$ が49.74、 $a^*$ が59.99、 $b^*$ が20.17で、試料布Aのそれとは大きく異なるものではなかった。紙製であるため、金属やプラスチックほど表面は滑らかでないが、布のような織り構造は持たない。図3-1と3-2が示すように、紙製色票では受光角度0度、15度、30度、60度の順に値が高くなり、正反射方向に一致する受光角度で反射率が最も高くなった。しかし、今回行った布を試料とした測定では図2-1から2-4に示したように、0度、15度、30度、45度、60度の順に分光反射率が高くなり、正反射方向である45度での反射率が最も高くなるという結果は得られなかった。図2-1から2-4はこの結果の典型として示したが、染色の色や設置の方向に影響されることなく全ての試料布においてこの結果は同じであった。

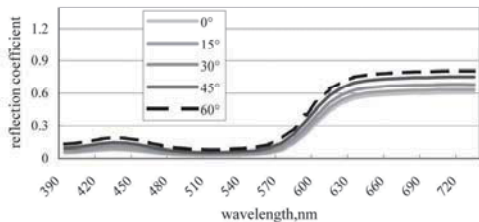


Fig. 2-1 Spectral reflectance curve of sample A-r. [cotton/plain/silket/red/vertical]

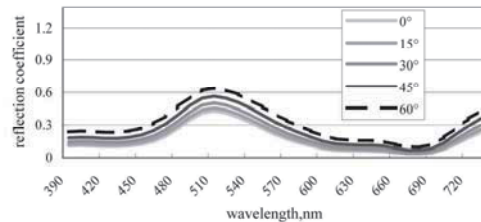


Fig. 2-2 Spectral reflectance curve of sample A-g. [cotton/plain/silket/green/vertical]

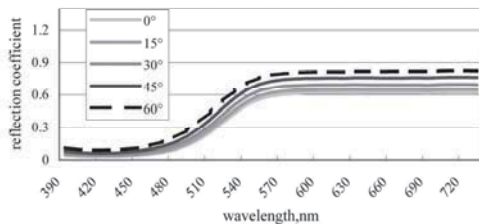


Fig. 2-3 Spectral reflectance curve of sample A-y. [cotton/plain/silket/yellow/vertical]

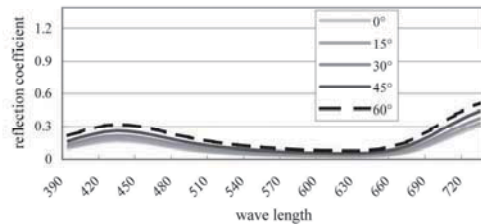


Fig. 2-4 Spectral reflectance curve of sample A-b. [cotton/plain/silket/blue/vertical]

また、0度、15度、30度、45度、60度の順に分光反射率が高くなっているが、その増加割合は均等ではなく、分光反射率の高い波長において顕著な差が見られることが二つ目の共通点であった。図2-1であれば、480nmから550nmと600nmから730nmでの結果の相違を指す。5水準の受光角度ともに分光反射率が低い480nmから550nmの波長間では、試料布の設置方向に関わらず受光角度間の分光反射率の差が大きくなく漸次高い値を示したが、600nmから730nmの分光反射率が高い波長間では5水準の受光角度間の反射率が異なり、受光角度が大きくなるほど分光反射率も高くなった。特に受光角度45度と60度で高い値を得た。紙製色票では、図3-1と3-2に示した



ようにそのような結果は得られず、5水準の受光角度間の増加割合に波長ごとの違いはなく、分光反射率を示すカーブがほぼ均等な距離を保ち、試料布での結果とは顕著な相違が現れた。試料布別の結果は後述するが、試料布Hの緑（g）とJの青（b）で差が見られなかった他は、染色した色や布方向に関わらず同様の結果を得た。

さらに共通した結果として、機器に設置した布の方向によって、分光反射率と受光角度別の分光反射率の増加割合が異なったことが挙げられる。反射する光の方向を妨げたり、変えたりする隆起などが無い平らな表面の試料であれば、機器に設置する試料面の方向を変えても、反射光の量や向きに違いはないと考えられる。しかし、今回測定した試料は経糸と緯糸を織り（編み）上げてできた布であるため、表面が規則性のある凸凹状構造を持ち、分光した光の反射方向を変化させる場合がある。そのため、測定機器に設置する試料布の方向を変えると分光反射率も異なるであろうと予想した。この予想した結果は40種の試料布全てに共通して得られ、経方向と緯方向、斜方向に設置して測定した結果、言い換えれば、観測の方向によって、分光反射率の値と受光角度による分光反射率の増加割合もそれに伴い異なった。この結果についても紙製色票の結果とは違いがあった。図3-1は経方向、図3-2は緯方向の結果を示したが、図に示さなかった斜方向とともに、紙製色票では設置方向別の受光角度ごとの分光反射率に差は見られなかった。

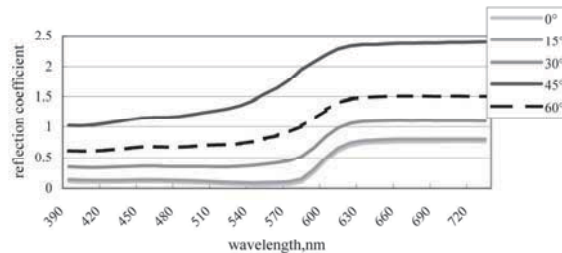


Fig. 3-1 Spectral reflectance curve of colored paper. [red/vertical]

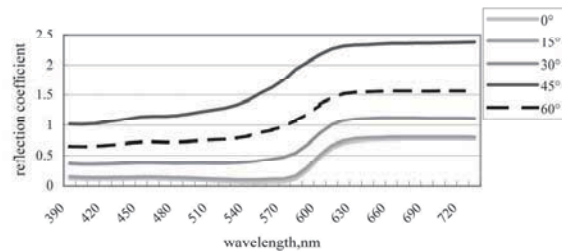


Fig. 3-2 Spectral reflectance curve of colored paper. [red/horizontal]

以上、受光角度0度、15度、30度、45度、60度の順に分光反射率が高くなった点とその増加割合は均等ではなく、反射率の高い波長において顕著な差が見られた点、さらに、機器に設置した布の方向によって分光反射率と受光角度による増加割合が異なった点は10種の試料原布に共通に

捉えられ、金属などの滑らかな表面を持つ試料の測定では得られない結果であることから、これらの結果が布の織り構造に起因したものであろうことが認められる。

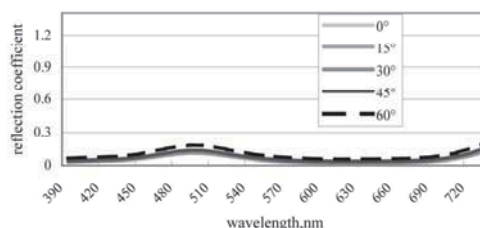


Fig. 4 Spectral reflectance curve of sample H-g.  
[wool/plain/green/vertical]

一つ目の共通結果である受光角度0度、15度、30度、45度、60度の順に分光反射率が高くなった点は、染色の色や観測の方向に影響されことなく全ての試料布においてこの結果は同じであったが、二つ目の共通結果である受光角度の相違による分光反射率の増加割合が均等ではなく、分光反射率の高い波長において顕著な差が見られる点は、各試料原布と染色した色でその差が異なっていた。図2-4が示す通り、青(b)に染色した試料布Aの結果では、分光反射率の高い波長間(420nmから460nm、690nmから730nm)と低い波長間(570nmから650nm)での各受光角度の結果の差は他の3色に比べて大きいものではない。また、図4には緑(g)で染色した試料布Hの経方向における結果を示しているが、図2-4よりさらに、受光角度5水準での分光反射率の差が小さく均等に近かった。同様の結果は、試料布Jの青(b)でも得られ、いずれも、全波長において分光反射率が0.3以下であった。分光反射率とは分光はされているが光の反射する割合を示しているため、高反射率とは反射する光の量が多いことを示す。高反射率の波長間で受光角度の相違によって分光反射率の増加割合が大きい結果となったのは、高反射率の波長間ではそうでない波長間より布表面で多くの光が反射される上に、さらに、その光が布の凸凹した構造によって反射を重ねるため、増加割合も相関して大きくなったものと考えられる。布以外の試料では通常正反射光方向での光量が最大となるが、布では受光角45度と60度で高反射率となったため、特に、この受光角度での表面相互反射量が顕著であった。これとは逆に、低反射率の波長間では反射光量自体が少ないため、相互反射によって光量が増加することも少ないと推測できる。平らで滑らかな表面の試料では、表面での相互反射が起らないため、高反射率、低反射率いずれの波長域でも受光角度の相違によって分光反射率が変化する、あるいは、その割合が均等ではないといった結果は得られない。つまり、この結果も布特有の結果で、その要因が表面構造に起因することは明らかである。

機器に設置した布の方向によって受光角度ごとに分光反射率の増加割合が異なった点が三つ目に共通する結果であったが、各試料原布とさらに染色したそれぞれの色によって特徴が現われた。シルケット未加工で試料布Aと同じ繊維・同じ織り組織の試料布Bでは、測定値は同値ではないが、図2-1から2-4とほぼ同じ傾向の結果が得られた。つまり、高反射率波長域において、受光角度0



度、15度、30度、45度、60度の5水準の順に分光反射率が高くなり、経方向、斜方向、緯方向の順にその差が増加した。また、その結果は染色した4種の色に共通した。図5-1から5-3に黄(y)で染色した試料布Cの3方向における結果を示す。試料布CとAとは繊維の種類は同じであるが、織り組織が異なり、Cの方が立体感を強く感じさせる綾織りで光沢がある。受光角度が法線方向から離れるほど分光反射率が増加し、経方向、斜方向、緯方向の順に増加の割合が大きくなる結果は同じであるが、試料布A、Bよりその割合が顕著であった。図6-1から6-3は黄(y)に染めた試料布Dの設置方向別の結果である。これは、試料布A、B、Cとは異なり、緯方向、斜方向、経方向の順に増加の割合が大きくなっていることを示している。試料布Dについては、赤(r)、緑(g)、青(b)でも同様の結果が得られた。他の試料布は全て、経方向、斜方向、緯方向の順に受光角度ごとの分光反射率の増加割合が大きくなる結果を示したことから、織り組織の違いが影響したものと考えられる。試料布Dの繊維は試料布A、B、C、E、Fと同じであるが、朱子織りで製織された布である。この朱子織は緯糸より経糸が多く布表面に表出し、また、経糸と緯糸の交錯点が少ないため、表面の凸凹が小さく滑らかである。化学繊維のように毛羽の少ない繊維であれば、プラスチックのような光沢が見られる織り組織である。試料布Dは一つの方向に並ぶ経糸が表面を多く覆っているため、一方向に光の反射が強化される相互反射になったための結果であろうと類推される。また、設置方向は異なるが、試料布Cの反射率の差が大きくなった結果の原因も同様で、綾織りで表出した織り糸によって光の反射量が均等とならなかったことによると考えられる。これとは逆に、編み組織の試料布F(図7-1,7-2,7-3)やHのように繊維の毛羽が多く見られる表面や先に示した試料布AやBのように経糸と緯糸が交互に表出する表面では反射光の相互反射がアトランダムとなったため、ひとつの観察方向に強く反射が見られる結果は得られなかった。

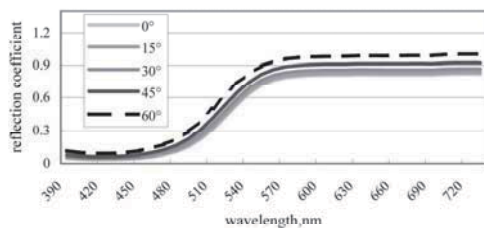


Fig. 5-1 Spectral reflectance curve of sample C-y.  
[cotton/twill/silket/yellow/vertical]

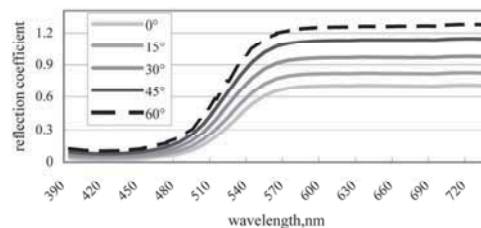


Fig. 5-2 Spectral reflectance curve of sample C-y.  
[cotton/twill/silket/yellow/horizontal]

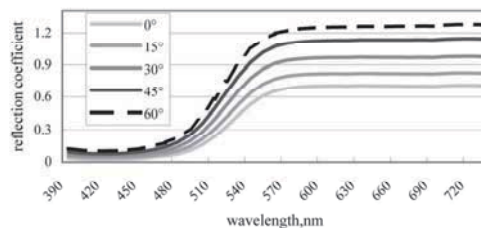


Fig. 5-3 Spectral reflectance curve of sample C-y.  
[cotton/twill/silket/yellow/horizontal]

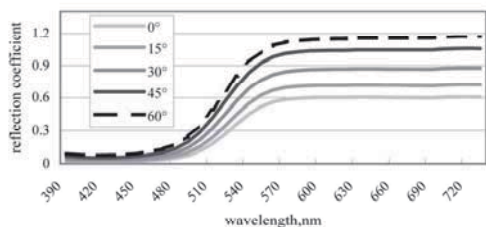


Fig. 6-1 Spectral reflectance curve of sample D-y. [cotton/satin/yellow/vertical]

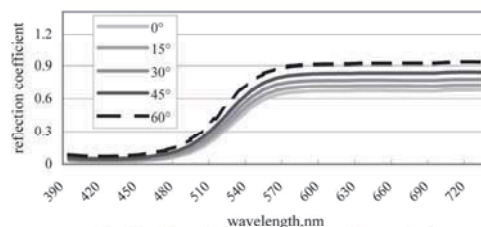


Fig. 6-2 Spectral reflectance curve of sample D-y. [cotton/satin/yellow/horizontal]

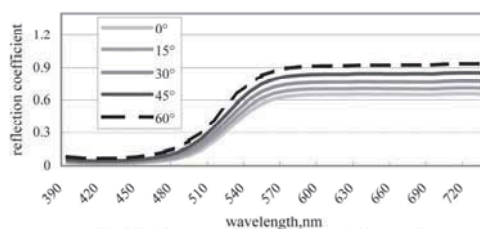


Fig. 6-3 Spectral reflectance curve of sample D-y. [cotton/satin/yellow/bias]

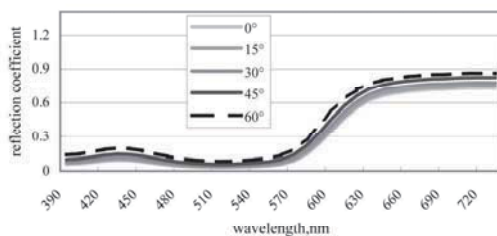


Fig. 7-1 Spectral reflectance curve of sample F-r. [cotton/knitting/yellow/vertical]

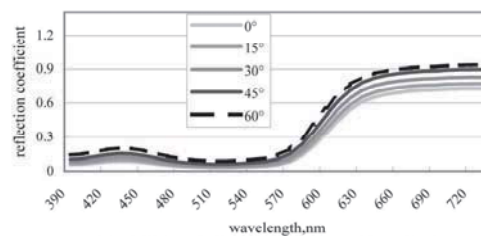


Fig. 7-2 Spectral reflectance curve of sample F-r. [cotton/knitting/yellow/horizontal]

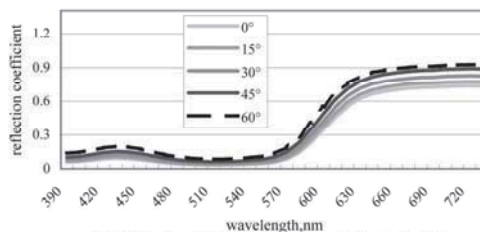


Fig. 7-3 Spectral reflectance curve of sample F-r. [cotton/knitting/yellow/bias]

3.2. XYZ表色系一反射率

Table 4-1 Luminance factor (percentage values) of 20 experiment samples calculated from spectra. [dyeing color r : red, g : green.]

setng direction	receiving angle	sample label - dyeing color									
		A-r	B-r	C-r	D-r	E-r	F-r	G-r	H-r	I-r	J-r
vertical	0°	13.54	15.11	16.49	10.67	12.90	15.02	12.10	8.56	14.54	8.75
	15°	14.75	16.22	17.26	13.80	13.62	15.91	16.08	8.67	15.95	8.85
	30°	16.92	18.17	18.68	18.18	15.15	17.64	19.48	9.27	18.71	9.52
	45°	20.13	21.16	21.25	22.95	17.90	20.42	24.25	10.83	23.76	11.05
	60°	23.96	25.16	25.73	26.67	22.70	24.52	29.78	13.96	31.34	13.94
horizontal	0°	14.42	16.06	12.99	12.39	10.96	14.53	15.44	7.44	10.01	9.73
	15°	15.77	17.43	16.53	13.81	13.27	16.17	16.21	8.29	12.63	9.41
	30°	18.05	19.72	21.27	15.73	16.25	18.64	18.88	9.48	17.02	10.24
	45°	21.62	23.38	26.62	18.67	19.96	21.97	23.75	11.21	22.89	12.38
	60°	26.42	28.40	31.20	23.85	23.98	25.86	31.59	13.65	28.16	15.77
bias	0°	13.95	15.58	13.89	12.18	11.70	15.05	13.68	7.91	11.21	9.16
	15°	15.30	16.84	16.49	13.86	13.38	16.50	15.41	8.46	13.56	8.89
	30°	17.63	19.10	19.76	16.05	15.80	18.77	17.97	9.40	17.36	9.25
	45°	21.12	22.65	23.34	19.04	19.09	21.84	22.45	11.06	22.81	10.35
	60°	25.68	27.42	27.03	23.09	23.30	25.48	29.09	13.64	29.52	12.59
vertical	0°	23.42	25.34	26.49	16.30	20.17	25.77	8.72	4.95	23.29	18.66
	15°	25.48	27.17	27.99	20.95	21.55	27.65	11.33	4.95	25.79	18.93
	30°	28.96	30.41	30.70	27.49	24.48	30.99	13.98	5.34	29.99	20.31
	45°	34.16	35.04	35.10	34.94	29.52	35.86	17.79	6.51	37.14	23.26
	60°	40.69	40.91	42.67	41.09	38.00	41.95	23.09	9.37	48.51	28.57
horizontal	0°	25.04	27.06	20.03	19.56	16.53	24.54	10.08	3.86	17.19	20.47
	15°	27.41	29.18	25.76	22.21	20.42	27.74	10.57	4.51	21.49	19.89
	30°	31.07	32.81	33.35	25.44	25.56	32.04	12.83	5.42	28.21	21.48
	45°	36.57	38.24	41.50	29.69	31.79	37.55	17.11	6.71	36.94	25.27
	60°	44.46	45.67	48.53	36.10	38.11	43.45	24.10	8.77	45.39	31.55
bias	0°	24.11	26.42	21.18	19.27	17.68	25.45	9.21	4.10	18.99	18.81
	15°	26.38	28.55	25.66	21.78	20.78	28.25	10.14	4.56	22.92	18.56
	30°	30.07	32.22	31.34	25.05	25.26	32.54	12.40	5.33	28.92	19.40
	45°	35.70	37.77	37.63	29.38	31.11	37.88	16.54	6.56	37.12	21.45
	60°	43.50	45.39	43.49	35.57	38.04	43.95	23.70	8.80	47.07	25.34

「2.3. 解析方法」に示した式(2)により、XYZ表色系の反射率Yを算出した。これは人が色を見る際の明度に対応するものである。表4-1と4-2に試料布と染色した色、設置方向別に5水準の受光角度ごとの反射率を示す。

受光角度別の結果では、試料布、染色した色、設置方向に関わらず全ての結果において、0度、15度、30度、45度、60度の順に反射率が高くなった。また、0度から15度、15度から30度までの変化と、30度から45度、45度から60度までの変化は異なり、後者の方が反射率の高くなる割合が大きかった。比較のために測定した赤の紙製色票では、設置方向の違いに関わらず受光角度45度での反射率が顕著な値を示した。このように平滑な表面の試料であれば、入射角度45度の正反射方向である受光角度45度付近で最も反射光量が多くなり、明度が高く見えるが、今回測定対象とした布では、正反射方向よりさらに大きい受光角度60度で反射率が高くなり、明度が高く見えることが明らかになった。

Table 4-2 Luminance factor (percentage values) of 20 experiment samples calculated from spectra. [dyeing color y : yellow, b : blue.]

setting direction	receiving angle	sample label - dyeing color									
		A-y	B-y	C-y	D-y	E-y	F-y	G-y	H-y	I-y	J-y
vertical	0°	49.79	51.29	63.94	45.75	54.97	57.03	41.74	43.36	46.51	36.48
	15°	52.48	53.26	65.52	55.12	57.02	58.68	51.24	43.70	49.47	37.15
	30°	56.97	56.83	68.54	68.16	60.87	61.65	62.63	46.05	54.83	39.30
	45°	63.01	61.95	73.72	82.61	67.19	66.01	77.92	51.30	64.04	43.30
	60°	68.94	67.62	81.39	92.10	75.60	71.07	90.75	59.56	77.11	50.07
horizontal	0°	52.23	53.91	54.30	52.38	48.93	55.27	53.62	39.35	40.16	40.21
	15°	55.96	56.91	64.29	56.24	55.84	59.11	56.39	42.50	46.17	39.08
	30°	61.27	61.92	77.09	60.96	64.59	64.21	63.71	47.23	54.77	42.54
	45°	68.78	69.39	91.23	66.66	73.98	70.32	74.97	53.49	65.22	50.42
	60°	77.83	77.41	102.58	74.81	81.13	75.36	89.06	59.07	73.80	59.70
bias	0°	51.89	52.38	57.27	50.25	50.97	56.91	49.98	40.69	42.87	37.87
	15°	55.45	55.19	64.12	54.92	56.47	60.24	52.51	42.55	47.71	36.89
	30°	60.90	60.00	72.16	60.46	63.73	65.03	58.51	45.84	54.81	38.17
	45°	68.51	67.24	80.57	67.15	72.44	71.05	68.08	50.86	64.16	41.19
	60°	77.37	75.17	86.44	74.68	80.36	76.85	80.03	57.07	75.08	46.64
vertical	0°	4.40	5.56	5.09	2.73	3.54	5.35	6.37	3.86	6.29	2.45
	15°	5.10	6.38	5.58	3.80	3.88	5.87	8.19	3.81	7.09	2.40
	30°	6.35	7.87	6.50	5.41	4.63	6.95	10.37	4.02	8.52	2.71
	45°	8.37	10.36	8.30	7.46	6.14	8.95	13.41	4.94	11.49	3.60
	60°	11.40	14.16	11.93	9.85	9.24	12.57	18.15	7.22	16.42	5.52
horizontal	0°	4.96	6.23	3.54	3.29	2.78	5.19	7.85	2.84	3.65	2.62
	15°	5.62	6.99	4.99	3.99	3.66	6.03	8.45	3.38	5.44	2.47
	30°	6.81	8.42	7.01	4.99	4.88	7.35	10.35	4.13	8.09	2.72
	45°	8.79	10.82	9.57	6.50	6.49	9.32	13.55	5.22	11.57	3.64
	60°	12.20	14.89	12.52	9.56	8.77	12.50	18.84	6.89	15.29	5.63
bias	0°	4.73	5.94	3.80	3.47	3.01	5.43	6.94	3.07	4.65	2.39
	15°	5.38	6.71	4.92	4.06	3.70	6.13	7.81	3.43	6.08	2.30
	30°	6.58	8.18	6.44	4.93	4.76	7.38	9.79	3.97	8.07	2.45
	45°	8.63	10.63	8.41	6.41	6.32	9.29	13.12	4.87	11.31	3.02
	60°	11.94	14.67	11.26	9.20	8.96	12.65	18.77	6.72	15.56	4.27

染色した色別の結果では、10 試料原布全てで黄 (y) での 5 水準の受光角度ごとの反射率変化が小さく、逆に、青 (b) での変化は大きかった。前項で示した分光反射率の結果からはその理由を導き出すことは難しい。分光反射率だけを検討すれば、上記とは反対に黄 (y) で反射率 (明度) 変化が大きく、青 (b) で変化が小さくなるのが予測できるからである。予測とは異なる結果となった原因としては、黄 (y) と青 (b) の色自体の明度の違いと布表面の繊維の毛羽立ちによる相互反射が考えられる。もともと高明度の黄 (y) では、黄に染色された布内部から反射した光の分光割合と照明光の白色光成分を多く含む布表面での相互反射光の分光割合とが近く、その明度が照明の白色光に影響され難かったのに対し、低明度の青 (b) に染色された布内部からの反射光と布表面での相互反射光では分光分布が異なるため、照明光をそのまま反射する正反射方向 45 度と 60 度では、表面で白色光が分離したようになり反射率変化が大きくなったものと考えられる。

5 水準の受光角度ごとの反射率変化における設置方向別の結果では、同じ綿繊維の試料布 A, B, C, D, E, F において、織り組織の違いによる影響が明らかとなった。平織り組織の試料布 A と

Bでは、青（b）以外で経方向での変化が最も小さく、緯方向と斜方向が同程度であったのに対し、綾織り組織の試料布Cでは、4色とも緯方向での変化が最も大きかった。編み組織の試料布EとFでは、4色とも経方向と緯方向、斜方向での結果が大きく変わらず、朱子織り組織の試料布Dでは、赤（r）と青（b）で緯方向、緑（g）と黄（y）で経方向での変化が大きかった。同じ平織り組織で繊維が異なる試料布G、H、I、Jでは、染色の色によって設置方向別の結果が異なり、繊維の違いによる影響は見出せなかった。3種の設置方向における5水準の受光角度別反射率の変化量についても、織り組織による表面構造の特徴が大きく影響する結果が得られた。

染色した色の特徴が影響する結果もあったが、XYZ表色系の反射率Y、つまり、人が色を見る際の明度にも他の滑らかな表面を持つ試料とは異なり、織り構造などによる不均一な試料表面に原因を持つ反射特性が反映される結果が得られた。

### 3.3. XYZ表色系—色度

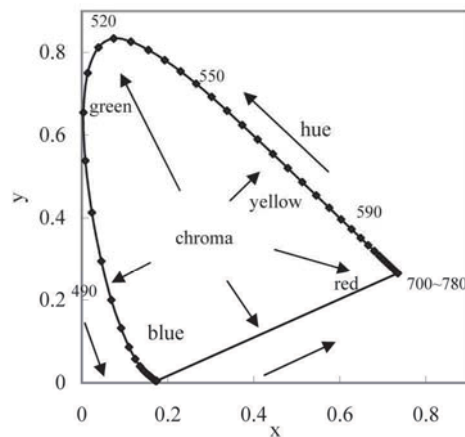


Fig. 8 Description of hue and chroma in the x,y chromaticity diagram. Arrows and data points show hue and chroma.

「2.3.解析方法」に示した式(5)と(6)により、XYZ表色系の色度x、yを算出した。これは人が色を見る際の彩度を含む色相に対応するものである。図8にXYZ表色系色度図を示す。図8には色相と彩度の位置関係を記したが、XYZ表色系色度図では、無彩色（白度点）は色度図の中心にあり、色度図周辺の色度x、yの色ほど高彩度色であることを示す図である。色度図内にプロットされた色度x、yによって、人が見ている色を理解することが可能である。図9-1と9-2に赤（r）に染色した試料布Aの経と緯方向の結果を示す。

代表的な結果としてこれらの図を示したが、4色に染色した10試料原布の3設置方向別における結果全てにおいて、5水準の受光角度ごとの色度が、0度、15度、30度、45度、60度の順に無彩色方向に変化した。これは、「3.1.分光反射率」と「3.2.XYZ表色系—反射率」で記述した結果



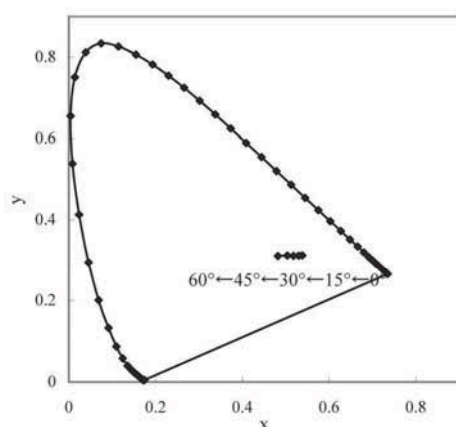


Fig.9-1 Chromaticity coordinate of sample A-r  
in the x,y chromaticity diagram.  
[cotton/plain/silket/red/vertical]

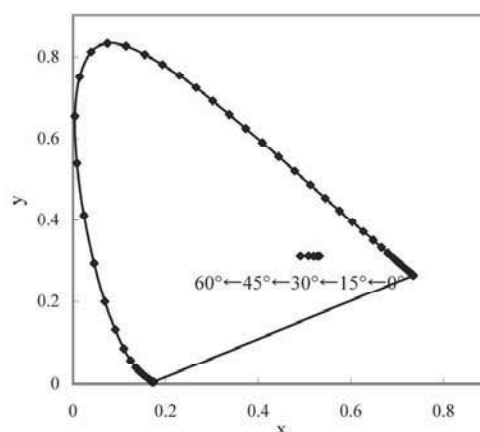


Fig. 9-2 Chromaticity coordinate of sample A-r  
in the x,y chromaticity diagram.  
[cotton/plain/silket/red/horizontal]

と同様の結果であった。金属のように平滑な表面の試料であれば、正反射方向での光量が最も多いため、光量に関する測定値は正反射方向の45度を頂点に、0度、15度、30度、45度と値が漸次変化し、60度では法線方向0度の値に戻ることが予想される。赤の紙製色票で行った比較測定結果を図10に示すが、受光角度45度での色度  $x$ ,  $y$  は白色点に最も近くなり、60度では逆に白色点から離れる方向に値が変化した。また、受光角度0度での色度  $x$ ,  $y$  は、試料布と紙製色票でほぼ同じ値であったのに、色票では5水準の受光角度ごとの色度変化が大きく、同じ赤でも布と紙とでは観察方向の違いで色の見え方が大きく異なることが明らかになった。今回測定した試料布は、布の織り組織によって表面での反射光の方向や光量に布特有の変化・増幅が起り、金属などとは異なる結果が予測されたが、紙製色票の結果との比較からもその予測が確かめられた。

分光反射率とXYZ表色系の反射率、色度はそれぞれ示す値も意味も異なるが、5水準の受光角度において、0度、15度、30度、45度、60度の順に値が変化するという結果は40試料布に共通して同じであった。また、XYZ表色系の反射率と色度の結果から、測定に用いた試料布は、入射光角度に対する受光角度0度、15度、30度、45度、60度の順に明るく、色褪せて見えることも明らかになった。

5水準の受光角度ごとの色度変化について、染色した色別の結果では、試料布Iの緯方向で少し変化に差が見られたほかは、緑 (g), 黄 (y), 青 (b) の3色ともに、受光角度ごとの変化は小さく、かつ均等に变化していた。特に、試料布G (図11), H, Jの黄 (y) での変化が小さかった。また、試料布Iで均等に变化していたほかは、赤 (r) では受光角度ごとの色度変化に特徴が現われ、9試料原布において、60度での色度変化が大きかった。染色した色で結果が異なった原因は、染色した色自体の彩度と明度の違いによるものと考えられる。表3に示した通り、10試料原布では、赤 (r) は彩度の高い色に染まったが、緑 (g) と青 (b) は赤 (r) より彩度の低い色に、さらに、

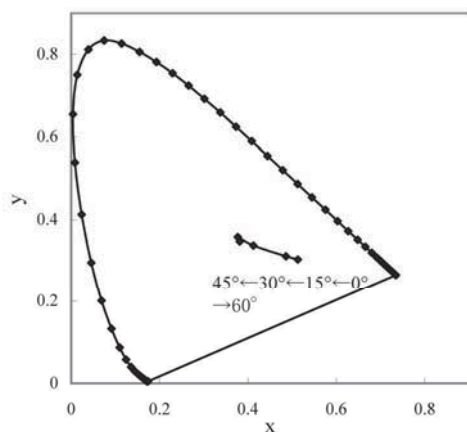


Fig.10 Chromaticity coordinate of colored paper in the x,y chromaticity diagram. [red/vertical]

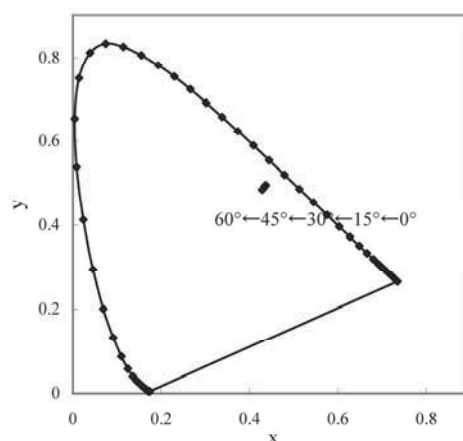


Fig.11 Chromaticity coordinate of sample G-y in the x,y chromaticity diagram. [silk/plain/yellow/vertical]

黄 (y) は高彩度・高明度色に染色された。そのため、45度照射、0度観察の条件下で人が見て感じる色として、赤 (r) は濃い色に感じられたが、黄 (y) と緑 (g)、青 (b) は赤 (r) ほど濃く感じられる色に染まっていなかった。そのため、赤 (r) と緑 (g)、黄 (y)、青 (b) では、繊維や織り組織に関係なく受光角度による色度変化が異なったのではないかと推測される。

5水準の受光角度ごとの色度変化についての設置方向別の結果では、前述の通り、赤 (r) 以外の試料布では変化が大きいものではなかったが、赤 (r) では試料布 A, B, C の経方向で受光角度 60 度での色度変化が大きく、試料布 D では、緯方向で同様の結果が得られた。試料布 E, F, G, H, J では、変化率は異なるが、3 設置方向全てで受光角度 60 度での色度変化が大きい点が共通していた。今回の試料布のように高彩度・低明度に染色された、いわゆる濃い色に染まった布では、色度、つまり人が見て感じる色相や彩度が織り組織や布の観察方向によって異なって見えることが明らかとなった。

#### 4. おわりに

今回は日常で多く用いられる布を対象に、入射光角度を 45 度に固定して受光角度を 0 度から 60 度まで 15 度ずつ変角させてその分光反射率を測定し、布の表面反射の特性を捉えることを試みた。また、観察方向の違いによる布の色の見え方の相違を明らかにすることを目的に、分光反射率から色度を算出し検討を行った。

分光反射率の測定結果では、試料布の繊維や織り構造、染色した色、機器への設置方向に関わらず、受光角度 0 度から 60 度へ漸次値が高くなった。正反射方向 45 度で最も反射率が高くなれば、布からの反射光は鏡面反射成分と拡散反射成分のみで表現可能であろうと考えられる。しかし、今回の測定結果からは、布からの反射光に鏡面反射の特性を抽出することはできなかった。また、分

光反射率の高い波長では5水準の受光角度間の分光反射率の増加割合が異なり、受光角度が大きくなるほど分光反射率も値が高くなった。これは、布の織り構造や繊維の毛羽に起因する平らではない表面での相互反射が原因であると推察される。さらに、設置方向によって分光反射率に違いが現れる織り組織の試料布があり、相互反射の原因が織り（編み）構造にあるという推察を補強する結果も得られた。

X Y Z 表色系の反射率と色度の結果でも分光反射率と同じく、正反射方向を中心に値が変化するのではなく、受光角度0度から60度へ順次変化した。つまり、法線方向を始点に観察方向を変化させて物を見る場合、滑らかな表面の物であれば正反射方向で最も明るく色褪せて見えるが、布の色では正反射方向を超えた角度でさらに、色が明るく色褪せて見えることが明らかとなった。ただし、その変化割合は小さく、滑らかな表面の物では正反射方向で鏡面反射による白色光により白く見えるが、布の色は白く見えるのではなく、受光角度60度で彩度が低く色褪せて見える色度値となった。

今回の測定では、布の表面反射成分がこれまでに分類されてきた2ないし3の成分で説明可能かを検討した。その結果、拡散反射成分と布表面での相互反射成分が布からの反射を特徴付けていることが明らかになった。今後は、布表面の微細構造を考慮した反射光測定を行い、布特有の拡散反射成分と相互反射成分の特性を捉えたい。

#### 引用文献

- [1] 日本色彩学会編：『色彩科学ハンドブック第2版』，東京大学出版会，東京，pp.1151-1153 (1992)
- [2] 田中法博，富永昌治：「3次元反射モデルの解析と推定」，情報処理学会論文誌，vol.4，No.10，pp.1-11 (2000)
- [3] 西清吾，富永昌治：「絵の具の反射特性の計測と解析」，日本色彩学会誌，第31号，Supplement，pp.56-57 (2007)
- [4] 日本色彩学会編：『色彩科学ハンドブック第2版』，東京大学出版会，東京，pp.1115-1117 (1992)
- [5] 稲垣勝彦，赤川直亮：「織物の光沢に関する研究」，工業技術院繊維工業試験所研究報告，No.73，pp.79-85 (1965)
- [6] 稲垣勝彦，赤川直亮：「織物の反射機構のモデル化」，繊維学会誌，vol.27，No.5，pp.217-222 (1971)
- [7] 安田孝美：「布独特の材質感を表現するシェーディング・モデル」，NIKKEI COMPUTER GRAPHICS 1990年2月号，pp.150-159 (1990)
- [8] 高木元太郎，田中弘美：「布の光反射モデルのための表面反射特性の測定と検討」，1997年電子情報通信学会総合大会概要集，p.428 (1997)
- [9] 宇佐美賢子，上田和明，高木元太郎，田中弘美：「反射光解析に基づく布の異方性反射モデルの生成」，1999年電子情報通信学会総合大会概要集，p.285 (1999)
- [10] 呉寧，安田孝美，横井茂樹：「織目の表面構造に注目した反射モデルによる織布質感表現手法」，画像電子学会誌，vol.28，No.4，pp.358-366 (1999)