組織物色差判定に関する研究

(第1報) $L^*a^*b^*$ 色空間における色弁別領域の考察

東洋紡績総合研究所 駒 井 茂 (会員)
 東洋紡績総合研究所 山 田 陽 三

Judgement of Color Difference on Fabric

Part 1 : Consideration of Discriminate

Region in $L^*a^*b^*$ Uniform Color Space

Shigeru Komai and Yohzo Yamada

Research Institute, Toyobo Co., Ltd., Otsu, Shiga

Abstract

Color discriminate region of woven fabrics is studied through the perceived color difference of experts employed in color inspection. The correlation coefficient between perceived color difference (ΔE_p) by experts and colorimetric ones (ΔE^*_{ab}) was very high.

Color discriminate region which experts had a long term experience on the color differences is established in a smaller one than MacAdam's just noticeable difference (jnd) given by light source.

And an approximate ellipse which correspond to MacAdam's ellipse plotted in a^*b^* diagram can make use of the judgement of color differences.

(Received February 25, 1993)

(Accepted for Publication December 14, 1993)

摘 要

目的 毛織物色差検査に従事する専門家の色差判断基準領域を、視覚判定評価と測色色差との関係より明らかにする。

成果 専門家の知覚色差 ΔE_p と CIE LAB 色差式による色差値 ΔE^*_{ab} との相関係数は極めて高く、専門家が現実に行っている織物色差評価と色差値 ΔE^*_{ab} との合致する確率が高い。このような長期の学習効果を持つ専門家の色差判断基準領域は、マッカムダムが与えた識別領域よりも狭い領域で確立されていることが判明した。

さらに CIE LAB 上の色弁別領域の近似楕円を用いて、色差判定境界を定め、色差判定に応用する方法を示した。

(平成5年2月25日受理)

(平成5年12月14日審査終了)

1. 緒 論

繊維の染色工場において、色違いを色差値として定量的に記述することは、品質確保のために必要度が高い。この色弁別の定量化に関しては、古くから測色学を始めとして研究も多く、同時に測色器械の開発も行われている。ところが色弁別を調べるとき、感覚に依存する視覚判定評価の問題と色差量を表示する色差式が、CIE (国際照明委員会) から複数

個推薦されているという問題がある。

一方で日常的に色差検査に従事し、経験的に色差判断の基準となる領域 (以降色弁別領域と呼ぶ) を確立して運用している専門家がいます。この色差検査従事者の判定と色差式との関係については、いくつかの研究例がある。

Kuehni ら¹⁾は、塗装した厚紙、毛織物、ポリエステル織物を試料として、視覚判定と色差式との関係を調べている。それによると4種類の色差式 (CIE

LAB , $CIE\ LUV$, $FMC-2$, FCM) は、いずれもが測色色差と視覚判定との相関度が高いことを報告している。しかし一般に視覚判定と完全に合致する色差式については結論が出ていない²⁾。

McGregor³⁾ は、繊維物色差並びに色欠陥の測定と知覚について、 $CIE\ LAB$ 色差式との相関係数 (r) は、0.76以下という極めて低い値であると述べている。この理由として、視覚判定評価時の条件(サンプル、環境、測定手順)が不適切であることを指摘し、評価に際して注意を促している。

西松、酒井⁴⁾ は、パイル織物の色差認識について検討を行い、色差検査に従事する専門家は色差に関する長期的な学習効果により、その知覚感度が高く、色差判断基準を確立していると言及しているが、その基準については詳細な実験検討が必要であると述べている。

このように色差認識と評価に関しては、対象を織物に限定しても視覚判定の色差認識を調べることに重点がおかれ、この色差認識から得られる色弁別領域を、実用上必要度の高い色差判定へ応用する研究は、ほとんど報告されていない。

筆者らは、毛織物色差検査に従事する専門家達の現実に行っている視覚判定の評価基準を把握し、それと測色色差との関係から織物の色差判断領域と色差判定方法について検討した。

本報では、専門家の視覚判定評価と測色色差値との相関性を検討し、専門家が確立している色差判断基準の領域および判定境界を実験により明らかにする。さらに、この評価結果から得られる色弁別領域を均等知覚空間($CIE1976\ (L^*a^*b^*)$ 色空間略して $CIE\ LAB$) 上の色差判定法へ応用する方法について述べる。

2. 色弁別に関する実験検討

2.1 $CIE\ LAB$ の色弁別領域

色の弁別については、MacAdam の実験結果が知られている⁵⁾。それによると標準的観測者の色弁別領域は、 xy 色度図上、楕円形状で表示される。その楕円の軸は方向性を持ち、青色領域ではわずかの差が検出されるのに、緑色領域ではかなりの距離の隔りがないと検出されないことを示している。またこの楕円は色弁別に関係するが色弁別領域そのものではなく、この楕円の3倍が色弁別領域(jnd : just noticeable difference)に相当する。この MacAd-

am の楕円と jnd は明確に区別されるものである。

一般に2点間の距離が常にどの色の領域でも、ほぼ一定色差の知覚を与えるような色空間の研究は多いが、 $CIE\ LAB$ もその中の一つである。この色空間は、実際面における規格統一として CIE が勧告していること、また繊維工業で取り扱われるような小さな色差に使用される頻度が高くなってきていることの二つの理由で以下の議論には、この $CIE\ LAB$ を用いる。

$CIE\ LAB$ は、次のように定義されている⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116 \cdot (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \cdot [(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\ b^* &= 200 \cdot [(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

いずれも、 X/X_n , Y/Y_n , $Z/Z_n > 0.008856$ である。

ただし X , Y , Z : 対象とする物体の3刺激値

X_n , Y_n , Z_n : 照明に用いた標準光の3刺激値

またおのおの L^* , a^* , b^* をもって与えられる2色間の色差は、次式で求められる。

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$CIE\ LAB$ の MacAdam 楕円軌跡 (xy 色度図上の MacAdam 楕円を変換したもの) は、やはり色弁別領域に対応する。従って本節では、 $CIE\ LAB$ の任意の色点が与えられたとき、この色点に対応する MacAdam 楕円軌跡の算出方法について述べる^{7,8)}。

基準色点を (L^*_0 , a^*_0 , b^*_0) とする。この色点に対する MacAdam 楕円軌跡を数値列として求めるための算出手順を以下にまとめる。

〔算出手順〕

- (1) (L^*_0 , a^*_0 , b^*_0) より明度 L^*_0 を与える。
 - (2) (L^*_0 , a^*_0 , b^*_0) を XYZ 表色系へ変換する。
 - (3) xy 色度図の基準色点 (x_0 , y_0) を求める。
 - (4) MacAdam diagram⁹⁾ より測度係数 g_{11} , $2g_{12}$, g_{22} を求める。
 - (5) MacAdam 楕円パラメータ¹⁰⁾ (a , b , θ) を求める。
 - (6) MacAdam 楕円上に、離散点 (x_i , y_i) ($i=1 \sim n$) を設定する。
 - (7) 離散点を XYZ 表色系へ変換する。
 - (8) 離散点を $CIE\ LAB$ へ変換し、MacAdam 楕円軌跡 (L^*_i , a^*_i , b^*_i) ($i=1 \sim n$) が得られる。
- なお jnd 軌跡は、楕円パラメータを ($3a$, $3b$, θ) として同様の手順で算出する。

図1は、このようにして算出した jnd 軌跡を描いたものである。離散点 $n=15$ (黒丸) とし、 $L^*=20$, 40 , 60 , 80 , $a^*_0=2.1$, $b^*_0=-8.5$ の色点に対応する。

Fig. 1 Just noticeable difference (jnd) of constant lightness plotted in the a^*b^* diagram
Ref. color value : $a^*_0=2.1$, $b^*_0=-8.5$

実線は離散点を滑らかに結んだものである。明度 L^* が増加すると色弁別領域が広がる。

ここで算出時の MacAdam diagram の読み取り誤差を見積るため、MacAdam が実験で与えた色点の楕円パラメータと比較した (表 1)。

パラメータ (a , b , θ) の読み取り誤差は約 5% 程度となった。

2.2 試料および実験方法

試料に用いた毛織物は、特別に染色したものでなく、通常の生産工程を通して得られたものを利用している。視覚判定は、
(1) 相関性を調べる。

(2) 色弁別領域を調べる。

の二つの目的のため試料を 2 ブロックに分けた。(1) の目的のための試料は、総数 80 対の織物を準備した。ウール 100% の織物が 60%、ウールとエステル混紡織物が 40% である。試料の大きさは、 10×10 cm とした。色彩値は、ミノルタカラーセンサー (CF101) を用いて、各試料中央付近の測色を行い、XYZ 刺激値を測定し、JIS Z 8730 に従い、この XYZ から CIE LAB の座標値を求めた。測色時試料背景は、試料によっては測色値に影響を与えることが考えられるが、目視検査と同条件となるように黒色 (N3) としている。

使用した試料の色分布を図 2 に示す。

(2) の目的のための試料は、基準とする試料の色座標値に対して 360° にわたる、わずかに色の異なる試料を得ることが望ましいが、現実にはこのような試料は得られないので、同一色の生産ロットからサンプルを切出し、測色色彩値を求めてから準備した。また明度による差を除外するため、ここで使う試料はほぼ $\Delta L^* \leq 1.0$ と測定されたものに限定した。試料は 4 グループ準備した (表 2)。

いずれのグループでも最初のサンプルを基準色とした。なお (1), (2) とともカラーセンサー測色時には、おのおの 10 回の繰り返し測定を行い、その平均値を求めて色彩値としている。

視覚判定実験は、JIS Z 8723 (表面色の視感比較方法) に準拠して、晴天時の北窓昼光下 (実験時の平均照度 1,000 lx) で、黒色背景 (N3) の上に 1 対の織物試料を並べて提示し、知覚される色差感度の大小を次の 4 段階評価法を用いて目視判断させた。

(判定評価) (評点) (評価記号)

- ① 色の差がほとんど認められない +1 点 ○
- ② 色の差がわずかに認められる +2 点 △
- ③ 色の差が相当認められる +3 点 ×
- ④ 色の差が顕著である +4 点 ××

Table 1 Comparison between experimental value and read value

No.	Color value		MacAdam's experiment			Read value		
	x_0	y_0	$10^3 \cdot a$	$10^3 \cdot b$	θ	$10^3 \cdot a$	$10^3 \cdot b$	θ
1	0.212	0.550	5.8	2.3	100.0	5.8	2.3	100.6
2	0.258	0.450	5.0	2.0	92.0	4.8	1.9	94.8
3	0.152	0.365	3.8	1.9	110.0	3.7	1.8	114.2
4	0.280	0.385	4.0	1.5	75.5	3.8	1.5	74.8
5	0.305	0.323	2.3	0.9	58.0	2.1	0.86	58.0

Table 2 Colorimetric data for test woolen fabrics

Group	No.	L*	a*	b*	ΔE^*_{ab}	Group	No.	L*	a*	b*	ΔE^*_{ab}
I	0	15.2	2.1	-8.5	0	III	0	58.2	14.4	18.7	0
	1	15.0	2.1	-8.4	0.22		1	58.1	14.3	19.4	0.71
	2	14.9	2.0	-8.4	0.33		2	58.4	14.3	19.2	0.55
	3	15.1	1.8	-7.7	0.86		3	58.7	14.4	19.2	0.71
	4	15.1	1.8	-7.9	0.68		4	58.7	14.5	19.1	0.65
	5	15.5	1.8	-7.8	0.82		5	57.7	14.6	19.2	0.74
	6	15.7	1.8	-7.9	0.84		6	58.5	14.1	18.6	0.44
	7	15.2	2.0	-8.3	0.22		7	58.7	14.3	19.2	0.71
	8	15.2	1.9	-8.5	0.20		8	58.2	14.1	19.2	0.58
	9	14.9	1.6	-7.0	1.61		9	58.4	14.6	19.0	0.41
	10	15.0	1.8	-7.5	1.06		10	58.0	15.8	18.9	1.42
	11	15.2	1.5	-7.0	1.62		11	57.8	15.4	18.5	1.10
	12	15.1	1.7	-7.2	1.36	IV	0	51.7	2.7	4.8	0
II	0	20.4	-2.6	-10.6	0		1	51.9	2.7	5.2	0.45
	1	20.9	-2.0	-11.9	1.52		2	51.9	3.3	5.6	1.02
	2	20.4	-2.5	-10.5	0.10		3	51.8	2.8	5.0	0.25
	3	20.9	-2.4	-10.6	0.54		4	52.0	2.7	5.1	0.42
	4	19.9	-1.9	-11.6	1.32		5	52.1	3.2	5.7	1.10
	5	19.9	-1.9	-11.4	1.17		6	51.5	2.6	5.0	0.30
	6	19.9	-1.9	-11.3	1.10		7	52.0	2.7	5.4	0.67
	7	19.9	-1.8	-11.3	1.17		8	52.2	2.6	5.2	0.65
	8	20.9	-2.2	-10.7	0.64		9	51.8	3.4	5.3	0.87
	9	20.1	-1.7	-11.6	1.38		10	51.8	3.1	5.2	0.73
	10	20.1	-1.9	-11.4	1.10

Fig. 2 Color distribution of test sample set in CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) space

なお、毛織物等の微少な色差認識では、通常表面加工による影響を除くために、突き合わせや重ね合わせ比較が行われることもあり、今回の判定もこの方法を許容している。使用した試料は判定を行う前には、照明する光へ充分順応させてあり、判定時間は制限していない。被験者は色差検査に従事している30～50才の5人の男性（経験年数10年以上）で、日常の検査と同様の基準で視覚判定をしてもらった。

2.3 結果と考察

試料(I)に關した視覚判定結果を表3に示す。 ΔE^*_{ab} はそれぞれ試験した対の織物についての測色色差であり、 $\bar{P}$ は5名の検査者が色差の見え方の大きさを4段階評価した評点の平均である。ここで $\overline{\Delta E_P}$ は平均点 $\bar{P}$ を重みとして次式で求めた。

$$\overline{\Delta E_P} = \Delta E^*_{ab} \cdot \bar{P} \tag{3}$$

この $\overline{\Delta E_P}$ は、実験で色差判定を行った検査者の知覚色差を表している。

図3は測色上の色差値 ΔE^*_{ab} と知覚色差 $\overline{\Delta E_P}$ との対応関係を示す。相関係数(r)は、0.955となり、専門家の知覚色差とCIE LAB色差との合致する確率は極めて高いことが分かった。

一般に西松ら⁹⁾、平井ら¹⁰⁾の実験でも明らかになっているように色差値 ΔE^*_{ab} が、0.5以内ならば色差なしと判断される確率は高く、1.3を越えると専門家でなくとも色差ありと判断する確率が高くなる。0.5～1.3までは、色差判断にあいまいさが伴う範囲であり、西松らは、この範囲が非専門家にとって専門家の方が小さいと述べている。この色差判断のあいまいな範囲を定量的に明らかにする必要がある。しかし明度が高いと判断がゆるくなり、明度の低い

紺系統色などは判断が厳しく、また、色相彩度により判断はかなり異なることが経験的に知られており、 ΔE^*_{ab} だけの解析ではこのあいまいな範囲を全色相にわたって規定することはできない。

そこで試料(2)による実験は、色差判定のあいまい

な領域を明らかにし、専門家の色差判断基準が確立している領域を定量的に求めることにある。そのため視覚判定評価結果を、MacAdam が求めた色弁別領域と比較する。色弁別領域は、2.1で述べた MacAdam 楕円と *jnd* の二つを考える。これらの物理的意味は、MacAdam 楕円は中心の色点と色違いが認識できない領域であり、*jnd* は中心色点とは色違いがはっきりと認識できる領域のことである。

表 4 は試料(2)の視覚判定結果を示す。表中には、4 グループの色相、基準色点、試験サンプル数と判定評価結果を示す。なお 1 試料毎に判定者 5 名の評価の多数決をとり、この判定者集団の判定評価とした。

図 4(a)~(d)が、試料(2)の(I)~(IV)に対応している。図中に視覚判定結果の判定評価記号 (○, △, ×, ××) を示した。また黒丸で示した実線が MacAdam 楕円軌跡、白丸で示した実線が *jnd* 軌跡である。図 4(a)で考察する。

この試料は、基準色点 $L^*_0=15.2$, $a^*_0=2.1$, $b^*_0=-8.5$ の紺色で色差判断の厳しい色相である。判定結果と MacAdam 楕円軌跡 (黒丸), *jnd* 軌跡 (白丸) を比較すると、MacAdam 楕円内部にあるサンプルは、すべて色差なしと判定され、*jnd* 軌跡より外側にあるサンプルは顕著に色差があると判定されている。一方、この両軌跡に挟まれた領域には、わ

Fig. 3 Correlation between colorimetric color differences (ΔE^*_{ab}) and perceived ones ($\overline{\Delta E_p}$)

Table 3 Comparison between colorimetric color differences (ΔE^*_{ab}) and average value of P received by experts

No.	ΔE^*_{ab}	$\bar{P}$	No.	ΔE^*_{ab}	$\bar{P}$	No.	ΔE^*_{ab}	$\bar{P}$	No.	ΔE^*_{ab}	$\bar{P}$
1	0.14	1.0	21	1.53	2.6	41	1.32	2.2	61	0.73	1.0
2	0.44	1.2	22	1.42	2.0	42	0.94	2.4	62	0.45	1.4
3	0.17	1.0	23	0.14	1.2	43	0.71	1.6	63	1.25	2.4
4	0.10	1.0	24	0.22	1.0	44	0.82	1.2	64	1.18	1.6
5	3.05	4.0	25	0.57	1.2	45	0.73	1.6	65	2.83	4.0
6	0.32	1.0	26	0.30	1.0	46	1.30	2.6	66	0.86	2.0
7	1.65	1.6	27	1.10	2.6	47	0.37	1.0	67	0.68	1.0
8	0.95	2.4	28	0.52	1.6	48	0.55	1.2	68	1.04	3.4
9	1.04	2.6	29	1.20	2.8	49	0.58	1.4	69	1.34	4.0
10	0.94	2.0	30	1.0	2.6	50	0.51	1.0	70	0.55	1.6
11	0.14	1.0	31	0.62	1.6	51	0.67	2.0	71	0.22	1.0
12	2.47	3.6	32	0.32	1.2	52	0.44	1.2	72	0.62	1.0
13	0.37	1.6	33	0.41	1.6	53	0.97	2.8	73	0.58	1.0
14	0.76	1.4	34	1.21	2.8	54	0.62	1.6	74	0.46	1.6
15	2.67	3.6	35	0.93	2.2	55	0.81	2.0	75	0.46	1.8
16	1.36	3.8	36	1.21	2.4	56	0.79	2.2	76	0.81	3.0
17	0.78	1.8	37	1.62	2.2	57	0.81	2.0	77	0.77	2.6
18	0.37	1.0	38	0.63	1.2	58	0.81	2.4	78	0.64	2.2
19	2.08	2.8	39	0.75	1.6	59	1.37	2.0	79	1.24	3.8
20	0.51	1.0	40	0.52	1.6	60	0.41	1.4	80	0.45	1.0

Table 4 Result of judgement for test woolen fabrics

Group		I	II	III	IV
Color		dark blue	dark blue	beige	gray
Ref.	L^*	15.2	20.4	58.2	51.7
color	a^*	2.1	- 2.6	14.4	2.7
value	b^*	- 8.5	-10.6	18.7	4.8
Sample Num.		12	10	11	10
Result	○	4	3	9	6
of	△	3	0	1	1
judge-	×	1	4	1	3
ment	×	4	3	0	0

ずかに色差が認められる (△) 判定と相当色差が認められる (×) 判定が存在しており、色差判断にあいまいさの発生する領域となっている (これを灰色領域と呼ぶ)。しかも図 4(b), (c), (d) から色相が異なってもほぼ同じ傾向がみられる。毛織物の場合、(△) 判定は色差がわずかに認められるが、実用上許容される場合が多く、(×) 判定は色差が相当認められるので実用上許容されない場合が多い。従って、この (△) と (×) を識別する判定境界が専門家の色差判断基準と考えられる。

図 4(a) の基準色点から離れる色相方向によって色差判断基準が、例えば a^* 軸方向では、0.48 以下、 b^* 軸方向では 0.60 以下のように異なり、 a^*b^* 平面の jnd 軌跡よりもかなり狭い領域で色差判断基準の領域を確立していることになっているのが分かる。

- 以上をまとめると、
- (i) 織物色差の色弁別領域は、基本的に MacAdam の楕円形状に従っているといつてよい。
 - (ii) 専門家の色差判断基準は、 a^*b^* 平面の jnd 軌跡よりもかなり狭い領域で確立されており、 ΔE^*_{ab} 値のみで全色相の判断を規定するのは難しい。
 - (iii) 色差判定のあいまいな領域は、MacAdam 楕円軌跡と jnd 軌跡とで挟まれた灰色領域であり、この領域内において織物色差判定境界が存在していることになる。

3. 色差判定法への応用

織物色差の最適判定境界を CIE LAB に見出せば、従来の経験と勘に依存する色差判定からの脱却がはかれることになる。

前章の色弁別領域を色差判定へ応用する場合、次

の問題がある。

- (1) CIE LAB の MacAdam 楕円軌跡が数値列で与えられるため、判定比較が困難である。
- (2) MacAdam 楕円軌跡は、CIE LAB で簡単な解析表示ができない。そのため判定基準の把握が困難である。

そこでこれらを解決するため、MacAdam 楕円軌跡を楕円で近似し、その解析的表示を与える。以下では、この楕円近似を用いて色差判定が行える可能性について述べる。

近似は最も簡単と思われる方法を採用する。

図 5 に xy 色度図上の MacAdam 楕円とそれに対応した a^*b^* 平面上の MacAdam 楕円軌跡を示す。

色点は、 O と O' 、 P_1 と Q_1 、 P_2 と Q_2 が変換で対応しているものとする。すなわち、

$$O(x_0, y_0) \longleftrightarrow O'(a^*_0, b^*_0)$$

$$P_1(x_1, y_1) \longleftrightarrow Q_1(a^*_1, b^*_1)$$

$$P_2(x_2, y_2) \longleftrightarrow Q_2(a^*_2, b^*_2)$$

a^*b^* 平面の 3 色点 O 、 Q_1 、 Q_2 を用いて近似楕円方程式を作る。ここで色点 P_1 、 P_2 の取り方は任意であるが、 xy 色度図上の楕円を特徴づける図 5 のような 2 色点とする。この場合の a^*b^* 平面上の楕円方程式は次式で与えられる。

$$\left(\frac{\cos^2\theta'}{A^2} + \frac{\sin^2\theta'}{B^2}\right) \cdot a^{*2} + 2 \cdot \left(\frac{1}{A^2} - \frac{1}{B^2}\right) \cdot \sin\theta' \cdot \cos\theta' \cdot a^* \cdot b^* + \left(\frac{\sin^2\theta'}{A^2} + \frac{\cos^2\theta'}{B^2}\right) \cdot b^{*2} = 1(4)$$

ここで A は楕円の長軸、 B は短軸、 θ' は長軸と a^* 軸とのなす角である。従ってこのパラメータ (A 、 B 、 θ') を決めればよい。図 5 より、

Fig. 4 Result of visual judgement with MacAdam's ellipse and *jnd* plotted in the *a*b** diagram
(a) $L^*=15.2, a^*=2.1, b^*=-8.5$
(b) $L^*=20.4, a^*=-2.6, b^*=-10.6$
(c) $L^*=58.2, a^*=14.4, b^*=18.7$
(d) $L^*=51.7, a^*=2.7, b^*=4.8$

$\tan\theta'=(b_1^*-b_0^*)/(a_1^*-a_0^*)$ (5)

また A, B は楕円が色点 Q_1, Q_2 を通ることから求めることができる。

$A=[(a_1^*-a_0^*)^2+(b_1^*-b_0^*)^2]^{1/2}$ (OQ_1 の長さ)

$$B=\frac{(a_2^*-a_0^*)\cdot\sin\theta'-(b_2^*-b_0^*)\cdot\cos\theta'}{\left[1-\left\{\frac{(a_2^*-a_0^*)\cos\theta'+(b_2^*-b_0^*)\sin\theta'}{(a_1^*-a_0^*)\cos\theta'+(b_1^*-b_0^*)\sin\theta'}\right\}^2\right]^{1/2}}$$
 (6)

以上の方法で求めた楕円を図 6(a), (b)に示す。

図 6(a)は, $L_0^*=15.2, a_0^*=2.1, b_0^*=-8.5$, (b)は

$L_0^*=51.7, a_0^*=2.7, b_0^*=4.8$ を基準色点としたものである。黒丸を付した実線が MacAdam 楕円軌跡, 三角印を付した破線が近似楕円である。図 6(a), (b)より L^* 値が高いと近似度が悪くなりそうである。そこでこの近似楕円の振る舞いを調べる。近似楕円と MacAdam 楕円軌跡との誤差 ε を図 7 に示すように, MacAdam 楕円軌跡上のある点を $T(a^*, b^*)$ とし, 直線 OT と近似楕円との交点を $S(\bar{a}^*, \bar{b}^*)$ とし、この 2 色点間距離 TS で定義する。

Fig. 5 Transformation from CIE chromaticity diagram to CIE $L^*a^*b^*$ Uniform Color Space
 O, O' : Ref. color values b, B : Minor semiaxis
 $P_i, Q_i (i=1, 2)$: color values θ, θ' : Angle in degrees
 a, A : Major semiaxis

Fig. 6 Comparison between MacAdam's ellipse and approximate ellipse
 (a) $L^*=15.2, a^*=2.1, b^*=-8.5$, (b) $L^*=51.7, a^*=2.7, b^*=4.8$

また近似楕円方程式(4)は次のように変形できる。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{a}^* &= a^*_0 + A \cdot \cos(\theta' + \varphi') \\ \tilde{b}^* &= b^*_0 + B \cdot \sin(\theta' + \varphi') \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで φ' は $O'Q_1$ と $O'T$ とのなす角である。

S 点は(7)式を満たすので、誤差 ε は、

$$\begin{aligned} \varepsilon &= [(\tilde{a}^* - a^*_i)^2 + (\tilde{b}^* - b^*_i)^2]^{1/2} \\ &\leq |\tilde{a}^* - a^*_i| + |\tilde{b}^* - b^*_i| \\ &= |a^*_0 - a^*_i| + |b^*_0 - b^*_i| + A + B \end{aligned} \quad (8)$$

となる。(8)式第1項と第2項は、基準色点と MacAdam 楕円軌跡上の色点との距離に關係する量であり、図1から L^* 値の増加とともに大きくなる。第3項と第4項の A, B は(6)式で示したように、近似に用いた色点 O' と Q_1, Q_2 とで決まる量であり、 O' が無彩色点に近いほど、言い換えると a^*_0, b^*_0 値が零に近いほど小さくなる。

以上のことから、ここで提案した CIE LAB の近似楕円は、基準色点 O' と2色点 Q_1, Q_2 で決定される。 L^* 値が高く、 a^*, b^* の絶対値が大きくなるとともに誤差上限が増大していくように振る舞う。しかしながら、明度が高くかつ色相彩度値が大きくなればなるほど、色差判定の許容値がゆるくなるという経験的な知見を考慮すれば、この近似楕円は CIE LAB の MacAdam 楕円軌跡を表す第1次近似と考えて、実用上の織物色差判定に適用しても良いといえる。

次に色差判定の境界を決定する方法について述べる。先に述べた紺色(図4(a))を例にする。図8の○, △, ×, ××は図4(a)のそれと同じである。破線は内側が MacAdam 楕円軌跡、外側が jnd 軌跡の近似楕円である。○, △と×との間を識別する楕円

Fig. 7 Definition of error (TS) between Mac Adam's ellipse and approximate ellipse
T : Color value on MacAdam's ellipse
S : Color value on approximate ellipse
O' : Reference color value
Q₁, Q₂ : Color value which is constructed approximate ellipse
 θ' : Angle of major semiaxis in MacAdam's ellipse
 ϕ' : Angle of color value (T) measured from color value (Q₁)

を実線で示した。この実線は、 $A=0.854$, $B=0.28$, $\theta'=122^\circ$ の楕円である。

このように a^*b^* 平面上に MacAdam 楕円軌跡を近似する楕円方程式が解析的に表示されれば、灰色領域内にある判断基準に合致するように楕円パラメータ (A, B, θ') を調整することにより色差判定境界を定め、色差判定に使用することが可能となる。

4. 結 論

織物色差検査に従事する専門家の視覚判定評価実験より、知覚色差と測色色差との相関性並びに色差判断基準を確立している領域について検討し、次の結果が得られた。

- (1)専門家の知覚色差 $\overline{\Delta E}_0$ と CIE LAB 色差式による色差値 ΔE^*_{ab} との相関係数 (r) は、0.955であった。長期間の学習効果により培われた専門家の色弁別力は高く、CIE LAB 色差式を用いて評価する織物色差と合致する確率は高い。
- (2)専門家の織物色差に関する色差判断基準領域は、基本的に MacAdam が与えた楕円形状に従い、jnd 軌跡よりもかなり狭い領域で確立されていることが分かった。また、色差判定境界は、MacAdam 楕円軌跡と jnd 軌跡とで挟まれた判定にあいまいさの発生する灰色領域内に存在している。

またここで得られた色弁別領域を、CIE LAB 上の色差判定法へ応用する方法を提案した。この方法

Fig. 8 Color difference judgement by approximate ellipse plotted in the a^*b^* diagram

は、 a^*b^* 平面上の MacAdam 楕円軌跡を楕円で近似する。明度、色相彩度値が大きくなると、この近似楕円の誤差は増大傾向を示すが、CIE LAB 上での色弁別領域を解析的に表示することが可能となり、楕円パラメータ (A, B, θ') の調整から決定される判定境界を用いて色差判定が行えることを示した。

なお明度差 ΔL^* による弁別領域については、光沢、毛羽の有無、表面形態などの影響を受け複雑であるので、本報では検討の対象外とした。

(謝辞) 本研究に関して数多くの協力を頂いた東洋紡績羊毛総括部および三重工場の関係各位に深謝します。また本論文をまとめる上で、ご教示を頂いた東洋紡績総合研究所原田研究室の原田隆司研究室長に感謝します。

参考文献

- 1) R. G. Kuehni, R. T. Marcus; Color Rev. Appl., 4, 83 (1979)
- 2) 寺主一成; 織機誌, 37, P444 (1984)
- 3) R. McGregor (安藤訳); 織学誌, 43, P-183 (1987)
- 4) 西松豊典, 酒井哲也; 織学誌, 42, T-248 (1986)
- 5) D. L. MacAdam; J. Opt. Soc. Am., 32, 247 (1942)
- 6) JIS Z 8730
- 7) A. R. Robertson; Color Res. Appl., 2, 7 (1977)
- 8) Wyszecki, Stiles; 「Color Science」, p. 528~p. 536, John Wiley & Sons Inc. (1967)
- 9) 同上 p. 531~p. 533
- 10) 同上 p. 530
- 11) 平井敏夫, 小松原仁; 照明学会全国大会予稿集, p. 58 (1978)