

色素色を用いた2色型色覚の混同色線に関する検討

福田 まさ子

東京医科大学眼科学教室

要 約

2色型色覚の混同色線、収束点及び中性点を色素色を用いて検討した。第1色盲8例、第2色盲24例を対象として、色票を用いてカラーマッチングを行い混同色線を求め、それぞれの混同色線の全交点を回帰分析し収束点を算出すると共に、さらに中性点を求めた。色素色を用いた収束点は、第1色盲は $x=0.811$, $y=0.189$ に収束し、Pitt, Juddの収束点に近似していたが、第2色盲では混同色線の勾配がPitt, Juddのものよりやや強くなり、収束点も $x=1.959$, $y=-0.959$ と従来の報告より右下方に存在していた。中性点に関しては、第1色盲495 nm付近、第2色盲は500 nm付近にあり、この値はJuddの報告とほぼ同様であった。以上より、中性点は色光の場合とほぼ同様であったが、収束点は色光の場合と若干異なることが示唆され、殊に第2色盲においてはその相違が顕著であった。(日眼会誌 96:790-797, 1992)

キーワード：2色型色覚, 混同色線, 収束点, 中性点, 色素色

Confusion Lines in Dichromatism Using Various Surface Colors

Masako Fukuda

Department of Ophthalmology, Tokyo Medical College

Abstract

Confusion lines, convergence points, and neutral points in dichromatism were examined using various surface colors. Confusion lines were obtained from 8 cases of protanopia and 24 cases of deuteranopia by color matching with the surface colors of the Farnsworth-Munsell 100 hue test, then regression analysis was carried out on the cross-points of all confusion lines obtained. Convergence points were obtained and neutral points were also calculated. The convergence point obtained from protanopia using surface colors converged to $x=0.811$ and $y=0.189$, which is a point near Pitt and Judd's convergence point. The confusion line gradient obtained from deuteranopia was steeper than that of Pitt and Judd's line. The convergence point of deuteranopia was $x=1.959$ and $y=-0.959$. Compared with previous reports, it was in the lower right region. The neutral point of protanopia was in the vicinity of 495 nm and that of deuteranopia in the vicinity of 500 nm. These two values were almost the same as the values in Judd's report. Considering the results mentioned above, the neutral point obtained with surface colors was almost the same as that obtained with spectrum color. From the above results, the convergence point was thought to be different from that obtained using spectrum color. In particular, the difference was significant in deuteranopia. (*Acta Soc Ophthalmol Jpn* 96: 790-797, 1992)

Key words: Dichromatism, Confusion lines, Convergence point, Neutral point, Surface colors

別刷請求先：160 新宿区西新宿6-7-1 東京医科大学眼科学教室 福田 まさ子
(平成3年10月31日受付, 平成4年1月20日改訂受理)

Reprint requests to: Masako Fukuda, M. D. Department of Ophthalmology, Tokyo Medical College,
6-7-1 Nishishinjuku, Shinjuku-ku 160, Japan

(Received October 31, 1991 and accepted in revised form January 20, 1992)

I 緒言

先天色覚異常に対する簡便な検査法として各種の色覚検査表が広く用いられているが、各検査表による異常の種類、程度の判定には一致しないことがある。また色覚検査表の多くは、Pitt¹⁾、Judd²⁾の混同色の理論をもとに作成されているが、この理論は色光を用いたカラーマッチングによって求めたものであり、この理論を直ちに色素色を使用した色覚検査表に当てはめる事は妥当とは思われない。現に色光と色素色を用いた色覚検査の結果において、異常の種類、程度の判定に相違が生じる事を指摘する報告³⁾⁻⁵⁾もみられる。

さらに、従来の研究において色光をもとに求めた収束点の座標に関しては、第1色盲はPittのデータにもとづきJuddが求めた $x=0.747, y=0.253$ 付近にあるが、第2色盲ではその座標は、種々の位置にあり一定していない⁶⁾⁷⁾。

そこで今回著者は、第1色盲、第2色盲に対して色素色を用いてカラーマッチングを行い、CIE色度図上において混同色線を求めた。さらに第1色盲、第2色盲各々の各混同色線間の全交点を統計的に処理し収束点を求め、従来の報告との比較を行った。また中性点についても検討を加えたので報告する。

II 対象及び実験方法

1. 対象

実験対象は、平成2年9月から3年5月までの間に東京医科大学病院眼科色覚外来を受診し、Neitzアノマスコープにより診断された第1色盲8例(15歳~41歳、平均22.0歳)と第2色盲24例(14歳~30歳、平均19.5歳)である。

2. 実験方法

1) CIE色度図上における色票の色度座標

色票としてLuneau社製のFarnsworth Munsell 100 hue test⁸⁾(以下F-M 100 hue test)を用いた。CIE色度座標(x, y)は、標準C光源のもとで色票キャップの分光反射率を高速分光光度計CMS-500を用いて390 nm から730 nm まで10 nm 間隔で測定し算出した値を用いた。その色票のCIE色度図上の座標は、図1の如くである。

2) カラーマッチング法

C光源近似のものとして、東芝EDL-D 65 蛍光ランプ(以下、C光源)照明下で、寒色側色票をA群(22番Y~31番GY)、B群(32番GY~41番BG)、C群

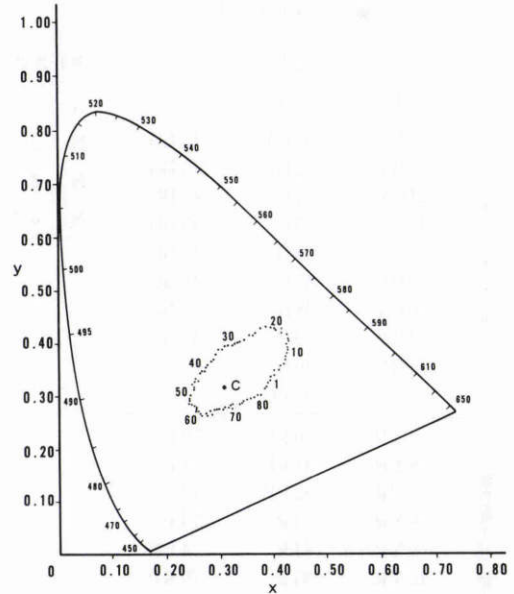


図1 CIE色度図上のF-M 100 hue testの座標。

(42番BG~49番BG)の3群に分け、それぞれの群に対応する暖色側色票を第1色盲ではA群(5番YR~11番YR)、B群(80番RP~4番R)、C群(70番P~79番RP)とし、第2色盲ではA群(1番R~10番YR)、B群(74番RP~83番R)、C群(65番PB~73番P)とし、寒色側色票A、B、C群とそれぞれに対応する第1、第2色盲の暖色側色票A、B、C群との間でカラーマッチングを行い、混同した色票ペアを求めた(表1)。

3) 収束点の検討

混同した色票ペアの色度座標 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) より、その2点を通る直線の方程式は、

$$y = \frac{(v_1 - v_2)}{(u_1 - u_2)}x + \frac{(u_1 \times v_2 - u_2 \times v_1)}{(u_1 - u_2)}$$

となる。次に、得られた直線の方程式を $y = a_1x + b_1$ で表すと、傾きは a_1 、高さは b_1 であるが、 a_1 、 b_1 を2点の色度座標 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) で表すと、

$$a_1 = \frac{(v_1 - v_2)}{(u_1 - u_2)}$$

$$b_1 = \frac{(u_1 \times v_2 - u_2 \times v_1)}{(u_1 - u_2)}$$

となる。

この様にして算出された2本の混同色線の直線の方程式 $y = a_1x + b_1$ 、 $y = a_2x + b_2$ より、直線の交点の座標 (x_c, y_c) を、直線の傾きと高さで表すと、

$$x_c = \frac{(b_2 - b_1)}{(a_1 - a_2)}$$

$$y_c = \frac{(a_1 \times b_2 - a_2 \times b_1)}{(a_1 - a_2)}$$

表1 使用した色票のペア

		有彩色票			無彩色票	
		A	B	C	N	
寒色側色票		22 Y	32 GY	42 BG	N	5
		23 GY	33 G	43 BG	N	5.5
		24 GY	34 G	44 BG	N	6
		25 GY	35 G	45 BG	N	6.5
		26 GY	36 G	46 BG		
		27 GY	37 G	47 BG		
		28 GY	38 G	48 BG		
		29 GY	39 G	49 BG		
		30 GY	40 G			
		31 GY	41 BG			
	暖色側色票(第1色盲)		5 YR	80 RP	70 P	
		6 YR	81 RP	71 P		
		7 YR	82 RP	72 P		
		8 YR	83 R	73 P		
		9 YR	84 R	74 RP		
		10 YR	85 R	75 RP		
		11 YR	1 R	76 RP		
			2 R	77 RP		
			3 R	78 RP		
			4 R	79 RP		
暖色側色票(第2色盲)			1 R	74 RP	65 PB	
		2 R	75 RP	66 P		
		3 R	76 RP	67 P		
		4 R	77 RP	68 P		
		5 YR	78 RP	69 P		
		6 YR	79 RP	70 P		
		7 YR	80 RP	71 P		
		8 YR	81 RP	72 P		
		9 YR	82 RP	73 P		
		10 YR	83 R			

となる。また、n本の異なった直線の交点の数は、

$n(n-1)/2$ の式で求めることができる。このようにして第1, 第2色盲それぞれのA, B, C3群の各々の混同色線とA, B, C3群の全ての混同色線(以下, 全群)に対して, 外挿法を用いて各混同色線の方程式から交点を求めた。さらに, 得られた各混同色線の交点を最小自乗法を用いて統計的に処理し回帰直線を求めた。

第1, 第2色盲のA, B, C3群の各々の混同色線より得られた回帰直線から収束点の方向性を検討した。さらに, 第1, 第2色盲の全群の混同色線の回帰直線とスペクトル軌跡の直線部及びその延長線($x+y=1$)との交点を収束点とし算出した。

4) 中性点の検討

無彩色票 N 5, N 5.5, N 6, N 6.5 と有彩色票 32 番

~49番との間でカラーマッチングを行い, 混同した有彩色票の頻度を検討した。白色点($x=0.3101, y=0.3163$)から混同した有彩色票を通る混同色線とCIE色度図のスペクトル軌跡との交点より中性点の範囲を求め, そのうち最も多く混同した有彩色票を用いて求めたものを本実験の中性点とした。

III 結果

1. 第1, 第2色盲の混同色線

第1色盲8例の混同色線の数は, 全群が92本(重複線を1本とすると60本)であり, 群別ではA群30本(同19本), B群39本(同26本), C群23本(同15本)であった。同様に第2色盲24例では, 全群が161本(同70本)であり, 群別ではA群56本(同27本), B群39本(同17本), C群66本(同26本)であった。CIE色度図上に第1色盲全群(図2)と第2色盲全群(図3)の混同色線を示した。

2. 第1, 第2色盲の収束点

1) A, B, C3群からの収束点の方向性

第1色盲のA群(混同色線30本)の交点の数は366個であり最小自乗法で求めた回帰直線は $y=-0.565x+0.598$ ($r^2=0.999$)であった。同様にB群(39本)の交点の数は719個であり回帰直線は $y=-0.385x+0.457$ ($r^2=0.987$), C群(23本)の交点の数は240個であり回帰直線は $y=-0.295x+0.392$ ($r^2=0.998$)であった(図4)。各回帰直線がスペクトル軌跡の直線

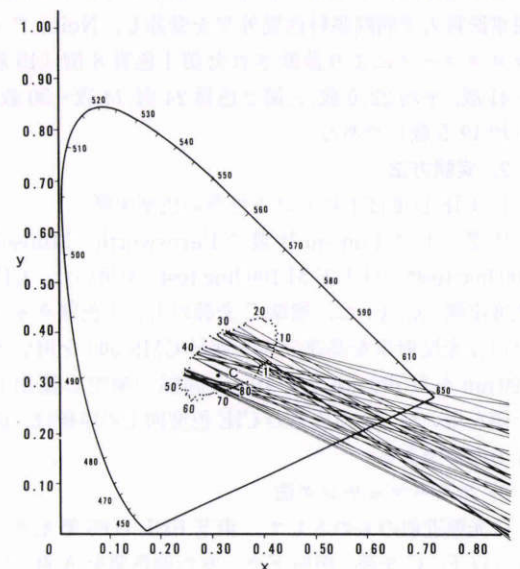


図2 第1色盲の混同色線。

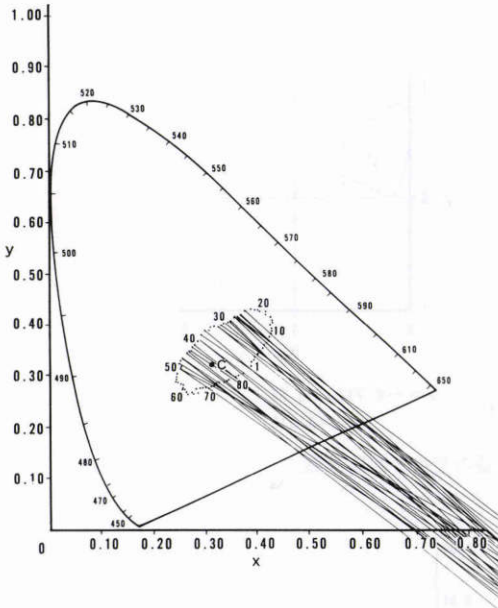


図3 第2色盲の混同色線。

部及びその延長線 ($x+y=1$) と交わる点は, Pitt, Judd の収束点よりもやや下方にみられた。

同様に第2色盲では, A群(56本)の交点の数は1491個であり回帰直線は $y=-0.857x+0.701$ ($r^2=0.980$), B群(39本)の交点の数は1121個であり回帰直線は $y=-0.809x+0.577$ ($r^2=0.985$), C群(66本)の交点の数は1461個であり回帰直線は $y=-0.791x+0.522$ ($r^2=0.997$)であった(図5)。各回帰直線と $x+y=1$ との交点は, Pitt, Judd の収束点よりも離れ

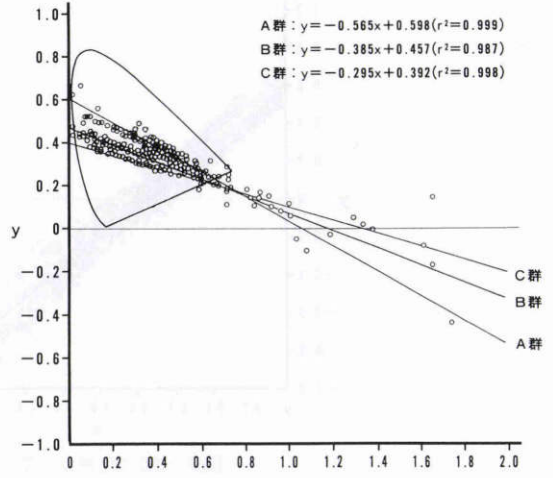


図4 第1色盲(3群)の混同色線の交点と回帰直線。

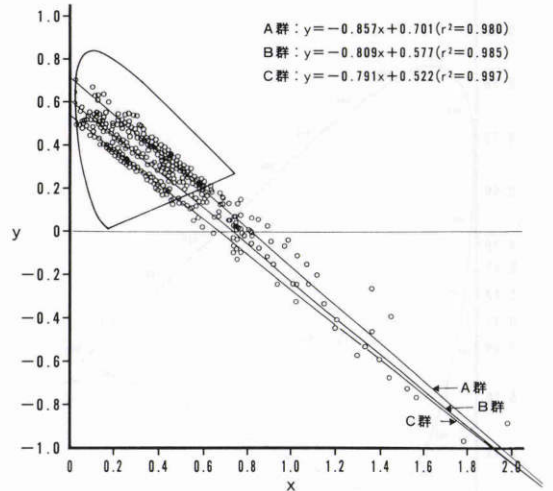


図5 第2色盲(3群)の混同色線の交点と回帰直線。

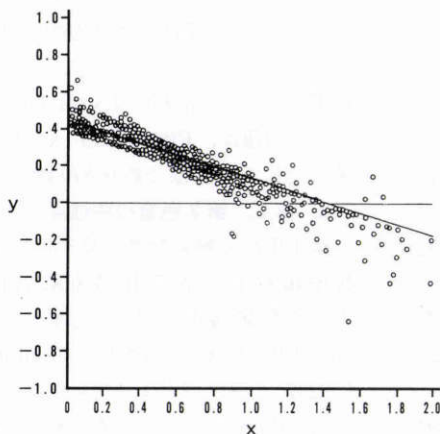
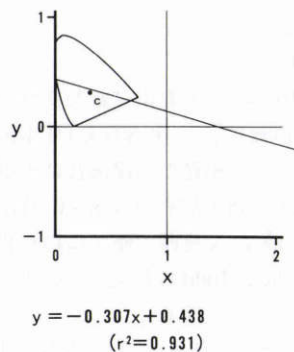


図6 第1色盲(全群)の混同色線の交点と回帰直線。



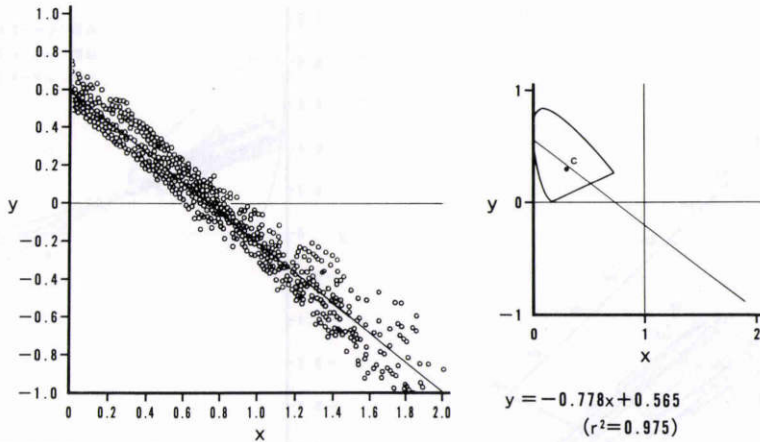


図7 第2色盲(全群)の混同色線の交点と回帰直線.

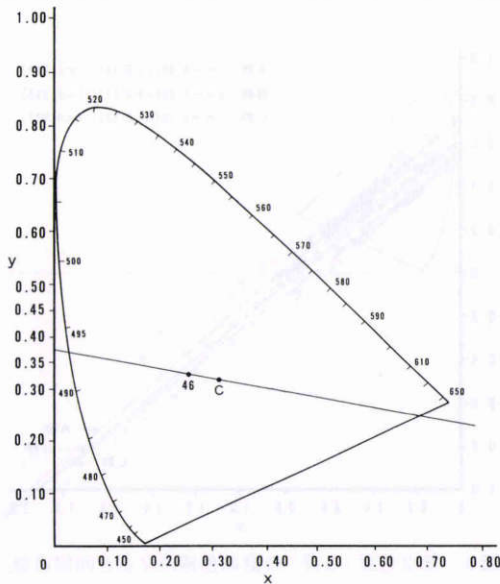


図8 第1色盲の中性点.

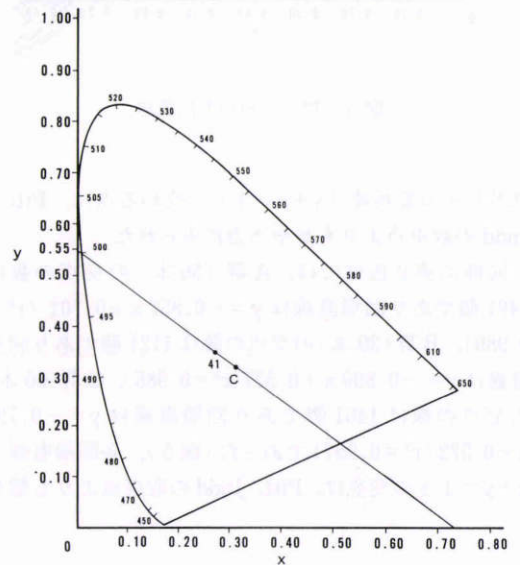


図9 第2色盲の中性点.

て右下方にみられた.

2) 全群からの収束点

第1色盲の全群(92本)より算出された交点の数は3958個であり、回帰直線は $y = -0.307x + 0.438$ ($r^2 = 0.931$)であり、スペクトル軌跡の直線部及びその延長線($x + y = 1$)との交点、即ち収束点は $x = 0.811$, $y = 0.189$ であった。この値は、 x 座標で僅かに約0.064だけ離れてはいるが、Pitt, Juddの収束点($x = 0.747$, $y = 0.253$)に近似していた(図6)。

同様に、第2色盲の全群(161本)の交点の数は12694個であり、回帰直線は $y = -0.778x + 0.565$ ($r^2 =$

0.975)であり、収束点は $x = 1.959$, $y = -0.959$ であった。この値は、Pitt, Judd ($x = 1.08$, $y = -0.08$)の値に比して x 座標で約0.879離れた(図7)。

3. 第1, 第2色盲の中性点

第1色盲で無彩色票と混同した有彩色票の頻度は、N 6-46番4例, N 5-46番3例, N 6-44番1例であり、有彩色票46番が7例と最も多かった。有彩色票44番($x = 0.2627$, $y = 0.3299$)から46番($x = 0.2544$, $y = 0.3287$)と白色点とより求めた中性点の範囲は493 nmから494 nmであり、頻度が高かった46番より算出した混同色線の方程式 $y = -0.223x + 0.385$ とスペクト

ル軌跡との交点 493 nm を中性点とした (図 8)。同様に、第 2 色盲について検討すると、混同した色票の頻度は、N 5-41 番 8 例、N 6-41 番 7 例、N 6-40 番 3 例、N 5-39 番 3 例、N 6-39 番 2 例、N 5-40 番 1 例であり、有彩色票 41 番が 15 例と最も多かった。有彩色票 39 番 ($x=0.2786, y=0.3574$) から 41 番 ($x=0.2708, y=0.3452$) と白色点とより求めた中性点の範囲は 500 nm から 507 nm であり、頻度が最も多かった 41 番より算出した $y=-0.735x+0.544$ とスペクトル軌跡との交点 500 nm を中性点とした (図 9)。

IV 考 按

2 色型色覚の混同色線及び収束点に関する検討は、従来より多くの研究者によりなされている。色光を用いた実験方法は、色混同の誤認が少ないと言われてお

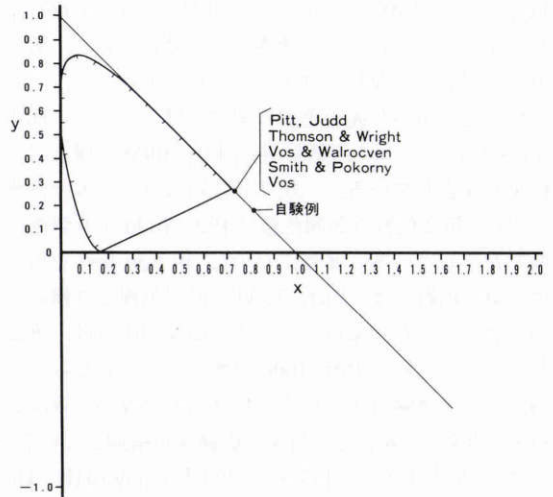


図 10 各研究者におけるの第 1 色盲の収束点.

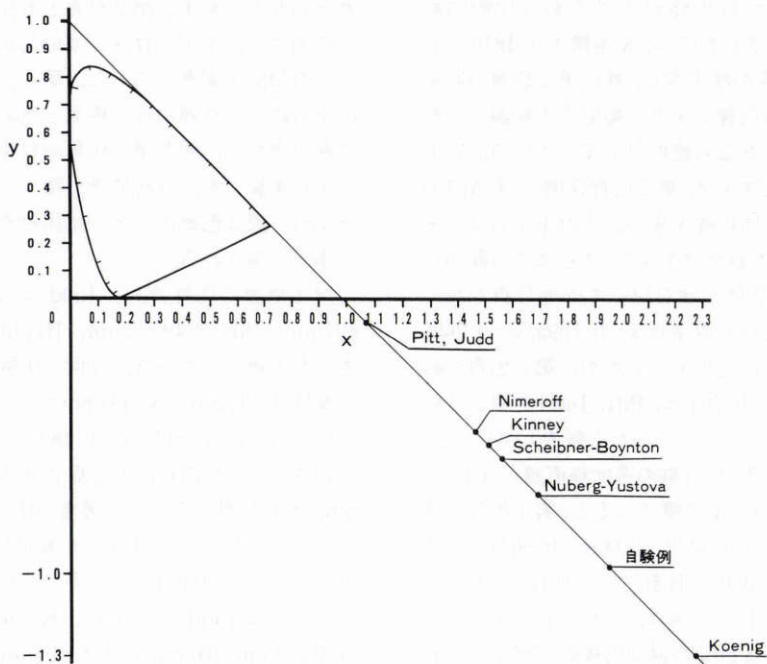


図 11 各研究者におけるの第 2 色盲の収束点.

り収束点を求める研究で多く用いられている。第 1 色盲の収束点に関しては、Pitt の結果をもとに Judd が求めた収束点 $x=0.747, y=0.253$ が代表的であり、その後の研究でも池田⁷⁾によれば、Vos & Walraven, Smith & Pokorny, Vos 及び Thomson & Wright⁹⁾からも $x=0.7465, y=0.2535$ であったと報告している (図 10)。第 2 色盲の収束点についても池田⁷⁾によれば、

Pitt, Judd の $x=1.08, y=-0.08$ を始め、Koenig の $x=2.30, y=-1.30$, Nuberg & Yustova の $x=1.70, y=-0.70$, Kinney の $x=1.51, y=-0.51$, Scheibner & Boynton の $x=1.56, y=-0.56$, 及び Nimeroff¹⁰⁾ の $x=1.40, y=-0.40$ 等の様々な結果が報告されており、収束点の x 座標の値で 1.08 から 2.30 に分布がみられ、未だ研究者間で収束点が異なっている (図

11). さらに Pitt は, 第2色盲の混同色線が平行したり, 1点に収束しない可能性をも示唆しており, 第2色盲の収束点に関しては未だ一致をみていない.

色素色を用いた混同色線に関する研究として, Halsey ら¹¹⁾はマンセル色票を用い, Pitt, Judd の値と同じ結果を報告している. 一方, 山本⁵⁾は改良マンセル色票を用い, 第2色盲の混同色線は Pitt, Judd より紫側に偏したとしている. また山口³⁾は, 40 hue test を用いて, 第2色盲では, Pitt, Judd の混同色線より傾斜が強く認められたと報告している. 山本や山口は, 第2色盲の混同色線が Pitt, Judd の報告とやや異なった理由として, 実験方法が色光と物体色との違い, 或は被検者の年齢, 性格, 色に対する経験等を指摘している. また, 神立¹²⁾, 岡部¹³⁾¹⁴⁾は Farnsworth Dichotomous Test Panel D-15 を用いたシミュレーション実験から収束点を解析し, 第1色盲の収束点の範囲は x 座標で 0.6868 から 0.8552 までであり比較的範囲が狭かったが, 第2色盲では, x 座標で 1.1810 から 4.6572 に存在する事が推定され, 殊に第2色盲の収束点に関しては, 混同色線が1点に集中する理論は支持できるが, 個人差がある可能性を示唆している. Verriest ら¹⁵⁾は, 第1色盲4例, 第2色盲5例で, F-M 100 hue test を用いて混同色線を求め, その中から良く密集した10本の混同色線だけを選び, さらにこの混同色線間の交点の内の15個だけを用いて回帰分析を行った. その結果, 第1色盲の収束点 $x=0.7395$, $y=0.2605$ は, Pitt, Judd の値に近似していたが, 第2色盲の収束点 $x=1.704$, $y=-0.704$ は, Pitt, Judd の値よりむしろ Nimeroff の値に近似していたと報告している.

著者は, まず A, B, C 3群の各回帰直線と $x+y=1$ との交点を算出した. x 座標でみると, 第1色盲では A 群 $x=0.9241$, B 群 $x=0.8829$, C 群 $x=0.8624$, 第2色盲では A 群 $x=2.0909$, B 群 $x=2.2147$, C 群 $x=2.2870$ であった. これらの値は, それぞれ収束点になり得るが, A, B, C 3群間の混同色線の交点が含まれていないため, 収束点の方向性をみるだけに留めた. 収束点は全群の混同色線の交点から回帰分析を行い算出した. その結果, 第1色盲では, 92本の混同色線から 3958個の交点を算出し, $x=0.811$, $y=0.189$ の収束点を求めた. この値は Pitt, Judd の収束点に近似はしているが x 座標で約 0.06 離れていた. 同様に, 第2色盲では, 161本の混同色線から 12694個の交点を算出し, $x=1.959$, $y=-0.959$ の収束点を求めた. これは, Pitt, Judd の値に比して x 座標で約 0.669~0.879 離

れており, Nuberg & Yustova の収束点よりさらに x 座標で 0.259 離れていた. Verriest らは混同色線を 10本だけ選択し, かつ交点の数も 15個と極めて条件を規定し, 色光を用いた実験条件に近づけようとしており, この値を直ちに色素色の収束点とする事は妥当とは思われない. 著者の実験で得た混同色線は, 第1色盲全群が 92本(重複線を1本とすると 60本), 第2色盲全群が 161本(同 70本)であり, 本数が多くばらつきがあるように見えるが, 混同色線の重複も多く図 6, 7 に示すように, 各交点が一定方向に密集していた. さらに, 各回帰直線の相関係数は, 第1色盲 $r^2=0.931$, 第2色盲 $r^2=0.975$ であり極めて良好な相関が得られ, 各混同線間の交点を直線として処理し, 収束点を求めたことは妥当と思われる. この値は, 神立, 岡部らのシミュレーションのパターンの比較より得られた収束点の範囲内にも入っており, 収束点として妥当と考えられる. 第1, 第2色盲とも従来から報告されている値より, 下方に存在していたが, 殊に第2色盲ではその傾向が顕著であった. 第2色盲の収束点が顕著に下方にずれた理由は, 色光と色素色の違いだけでは説明できない. 即ち第2色盲の収束点は, 従来の色光による実験でも, 各研究者で種々の成績がみられることから, 第2色盲の原因が錐体色素欠損説以外にもある事が示唆される.

第1色盲の中性点は, Judd²⁾によれば, Koenig は 497 nm, Pitt は 495.5 nm, Hecht ら¹⁶⁾は 498 nm であったと報告している. 今回の実験で得られた中性点の範囲は 493 nm から 494 nm であった. また第1色盲の収束点 ($x=0.811$, $y=0.189$) から白色点を通る混同色線 $y=-0.254x+0.395$ より求めた中性点は 494 nm, 無彩色色票から求めた著者の中性点は 493 nm であり, この値は, いずれも上記の範囲内にあり, かつ Pitt の値に近く, 中性点として妥当と思われた. 第2色盲の中性点は Judd²⁾によれば, Koenig は 503 nm, Pitt は 500.4 nm, Hecht ら¹⁶⁾は 510 nm であり, 各報告者間でばらつきがみられる. 著者の求めた中性点の範囲は 500 nm から 507 nm であった. また第2色盲の収束点 ($x=1.959$, $y=-0.959$) から白色点を通る混同色線 $y=-0.773x+0.556$ より求めた中性点は 504 nm, 無彩色色票から求めた著者の中性点は 500 nm であり, この値も上記の範囲内にあり, かつ Pitt の値とも一致していた. 中性点に関しても, 報告者間でわずかなばらつきがみられたが色素色による著者の結果は, 色光による Pitt の値にはほぼ近似している.

以上の結果から、中性点は色光の場合とほぼ同様であったが、収束点は色光の場合と若干異なる結果が得られた。

本研究の要旨は、第95回日本眼科学会総会において発表した。

稿を終えるにあたり、御指導、御校閲を賜りました太田安雄教授、清水金郎博士に深く感謝致します。

文 献

- 1) **Pitt FHG**: Characteristics of dichromatic vision. Medical Research Council, Report of the Committee on the Physiology of Vision XIV; Special Report Series 200, London, 1935.
- 2) **Judd DB**: Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision. *J Opt Soc Am* 35: 199—221, 1945.
- 3) 山口淑美: 色覚適性及び精密検査用40色相配列検査(40hue test)による先天性色覚異常の類型及び程度判定に関する研究. *日眼会誌* 90: 948—960, 1986.
- 4) 深見嘉一郎: Farnsworth Dichotomous Test Panel D-15の検討—色盲研究会・色覚研究会の有志による共同研究—. *眼科* 12: 220—231, 1970.
- 5) 山本邦夫: 先天性色覚異常者の混同色に関する研究. 第2報. 混同線について. *日眼会誌* 64: 2715—2723, 1960.
- 6) 太田安雄, 清水金郎: 色覚と色覚異常. 第21章. 先天性色覚異常の分類と特性. 東京, 金原出版, 159—182, 1990.
- 7) 池田光男: 色彩工学の基礎, 第10章. 色覚のメカニズム. 東京, 朝倉書店, 210—248, 1980.
- 8) **Farnsworth D**: The Farnsworth-Munsell 100 hue test and dichotomous tests for color vision. *J Opt Soc Am* 33: 568—578, 1943.
- 9) **Thomson LC, Wright WD**: The convergence of the tritanopic confusion loci and the derivation of the fundamental response functions. *J Opt Soc Am* 60: 966—969, 1970.
- 10) **Nimeroff I**: Deuteranopic convergence point. *J Opt Soc Am* 60: 966—969, 1970.
- 11) **Halsey RM, Chapanis A**: An experimental determination of some iso-chromaticity lines in color-deficient vision. *J Opt Soc Am* 42: 722—739, 1952.
- 12) 神立 敦, 岡部高雄, 北原健二: Farnsworth Dichotomous Test Panel D-15の解析—2色型色覚におけるシミュレーション—. *日眼会誌* 93: 1154—1159, 1989.
- 13) 岡部高雄, 神立 敦, 北原健二: Farnsworth Dichotomous Test Panel D-15の解析—2色型色盲におけるConvergence Pointと配列パターン—. *日眼会誌* 93: 1160—1166, 1989.
- 14) 岡部高雄, 神立 敦, 北原健二: Farnsworth Dichotomous Test Panel D-15の解析—Panel D-15からみた第2色盲のConvergence Point—. *日眼会誌* 94: 74—79, 1990.
- 15) **Verriest G, Gonella A**: An attempt at clinical determination by means of surface colours of the convergence points in congenital and acquired defects of colour vision, in Steriff EB (ed): *Modern Problems in Ophthalmology*, Basel, S. Karger, 205—212, 1972.
- 16) **Hecht S, Shlaer S**: The color vision of dichromats. I. Wavelength discrimination brightness distribution and color mixture. II. Saturation as the basis for wavelength discrimination and color mixture. *J Gen Physiol* 20: 71—72, 1936.