

研 究

照度レベルによる表面色の色の見えの変化と個人差

湯 尻 照

広島工業大学電気工学科 〒731-51 広島市佐伯区三宅 2-1-1

(1990年4月5日受付, 1990年6月28日受理)

Individual Variation of Color Appearance of Surface Colors for Various Illuminance Levels

Akira YUJIRI

Department of Electrical Engineering, Hiroshima Institute of Technology,
2-1-1, Miyake, Saeki-ku, Hiroshima 731-51

(Received April 5, 1990; Accepted June 28, 1990)

Individual variations of color appearance were investigated by employing the color-naming method for 12 test color chips under the illuminance levels of 0.1, 1, 10 and 1000 lx. The test color chips were presented in a foveal 10° field. A gray background of value N6 was used. Color appearance was estimated with the ratio of chromatic component to achromatic one, the hue component ratio, and the perceived lightness. A total of 50 subjects with normal color vision in the 18 to 23 year age range participated in the experiment. The results showed that the individual variations of chromatic components and lightness decreased with increasing of the illuminance. Small individual variations were obtained for the perceived hue of unique red, yellow and blue test color chips. On the other hand, large individual variations were obtained for greenish yellow, green and greenish blue test color chips.

1. は じ め に

色情報を伝達する場合, その対象が表面色の場合は, その面の照度レベルによって, どのように認識されているかを知ることが, 非常に重要であるが, このことについて, Hunt^{1,2)} は, 順応照度を暗所視から薄明視, 明所視領域へと上昇させると, その色の見えの colourfulness が増加するという現象をこれまでに得ている. さらに, 湯尻³⁾ によると, 照度レベルによる色の見えの色み, 色相, 明度の測定結果から, 色み成分は, 色の種類に関係なく照度レベルの上昇によって大きく変化し, 10 lx 以上の明所視領域になるとその増加の程度が小さくなり, 色相については, 緑成分を含んだ色の色相が, 明所視から薄明視領域に照度レベルが低下するにつれて, 青色側にシフトする現象を得ている. そして, 明るさについては, 赤や黄成分の色の照度レベルによる明度の変化が大きく, 青色については, 照度レベルによる変

化の小さいことの現象を得ている. そして, このような現象は, いずれも錐体と桿体が同時に作用する薄明視領域において, それらの特性の変化の大きいことをあきらかにしている.

しかし, 色の見えについては, 個人差が考えられるので, 多くの人が色の種類および照度レベルによって, その色をどのように認識しているかを知ることが重要である.

本論文では, 照度レベルによる色の見えの変化と, 被験者間の主観評価データのばらつきを調べ, 色情報伝達における基礎的データを求めることを目的として実験を行った.

2. 実 験

2.1 実験装置

表面色の色の見えは, それを照明する光源の分光組成および, 背景色によっても異なってくる. したがって,

Table 1 Colorimetric specifications for the 12 test color chips and an N6/background chip in Exp. Colorimetric values x , y , Y of the test color chips, when lit with the fluorescent lamp indicated.

Color chip No.	NCS notation	Munsell notation	CIE specification		
			x	y	Y
1	1090-R	4.6 R 4.2/14.3	0.594	0.316	14.98
2	0090-Y70R	9.9 R 6.0/13.6	0.563	0.373	32.63
3	0090-Y30R	6.4 Y R 7.2/13.4	0.532	0.424	47.86
4	0080-Y	4.5 Y 8.4/12.7	0.479	0.473	69.08
5	1080-G70Y	2.2 G Y 7.1/10.4	0.432	0.507	45.61
6	1080-G30Y	8.2 G Y 5.9/12.3	0.352	0.566	28.74
7	2070-G	4.2 G 5.0/10.8	0.250	0.487	19.46
8	2060-B70G	4.2 B G 5.1/10.0	0.205	0.381	19.46
9	2060-B30G	0.6 B 5.1/ 9.2	0.199	0.320	19.56
10	1070-B	9.5 B 5.1/11.2	0.187	0.247	19.05
11	2070-R70B	8.0 P B 3.6/11.3	0.232	0.196	9.26
12	1060-R30B	4.9 R P 4.5/13.9	0.469	0.266	16.96
Background		N 6 /	0.343	0.352	29.82

ここでは、その影響をできるだけ少なくするために、天井、壁、床が黒に塗られている高さ 2.6 m、横 2.5 m、奥行き 5 m の暗室の一面に高さ 2.3 m、横 2.3 m の無光沢の N6 に塗布されている板を貼り、その面に向けて高演色 AAA 形昼白色蛍光ランプで照明した。その光源の照明特性は、相関色温度 5000 K、平均演色評価数 R_a 99、特殊演色評価数 $R_9 \sim R_{15}$ はすべて 95 以上である。

2.2 実験条件

照度レベルによる色の見えの個人差を調べるための実験条件を設定する方法として、ここでは、照度レベルによる表面色の色の見えの変化を調べた実験³⁾のデータを参照して、それと同じテスト刺激の 12 種類の色票を使用した。使用した色票の NCS 表示、マンセル表示、および試料光源によって照明したときの色票と背景 N6 の CIE-1931 x, y 色度座標、視感反射率を Table 1 に示す。

テスト刺激の大きさは、背景 N6 のマスクによって 10 cm 角の正方形とした。そして、その刺激を観測するときに、刺激の視野サイズを小さくすると桿体視細胞の影響が入らなくなるため、ここでは、錐体と桿体視細胞の両方の作用の影響を含むように、刺激サイズを、10° 視野となるように 57 cm の距離から観測した。

色票面の照度レベルは、色みの変化が大きく、さらに緑成分を含む色の色相の変化が示された 0.1, 1.0, 10 lx と一般的に色比較をするときの最小照度である 1000 lx⁴⁾ の 4 照度レベルとした。

2.3 評価方法

色票の色の見えが、照度レベルによってどのように変化するかを、次のような方法によって測定した。

その方法として、最初に持ち点を 10 とし、呈示された色票を観測して、そこに感じる「有彩色成分(色み)」と「無彩色成分」の量に持ち点を配分し、次に、再び持ち点を 10 とし、今度は、その有彩色成分を「赤(R)」、「黄(Y)」、「緑(G)」、「青(B)」のうちから 1 色、または 2 色を選んで持ち点を配分した。さらに、再び、持ち点を 10 とし各色票の明るさの程度をマンセルバリューと対応するように明度で絶対評価した。

2.4 実験手続

被験者は、最初に実験者より、実験手続について詳細に説明を受けた後、予備実験を行って十分に実験方法を理解したうえで本実験に入った。そして、実験開始前に暗順応時間を 15 分以上とり、その後、試料光源によって、照度が 0.1 lx に照明された N6 の無彩色の面に 3 分以上順応した後、実験者によってランダムに 1 枚ずつ呈示された色票を、両眼の自然視で観測し色票の色の見えを測定した。そのとき、観測時間はとくに制限しなかった。同じ照度レベルで 12 種類の色票を各 2 回ずつ測定した。その後、1 lx, 10 lx, 1000 lx と順次照度レベルを変化させて同様に実験を行った。

そして、それを 1 セッションとして、2 セッションの測定を行った。実験は、暗室に 2 人、または 3 人ずつ入り測定を行った。その測定時間は 1 セッション、暗順応時間を含めて約 3 ~ 4 時間である。

被験者は18歳から23歳の男性31名、女性19名の合計50名で、全員、実験前に石原式検査表で色覚正常者であることを確認した。

3. 結果と考察

色の見えの評価については、個人内での評価のばらつきと個人間での評価のばらつきの両方が考えられるが、本研究では、個人間の評価のばらつきの程度を調べるとい目的で行ったので、個人内での評価のばらつきができるだけ小さくなるように、予備実験を行うことによって個人内の変動要素が少なくなるように心がけた。また、Table 1 の NCS 表示に示すように、刺激に用いた色票の種類に、色相差のとくに小さいものがなく、実験結果においても個人間のばらつきのほうが大きく示された。したがって、ここでは、各被験者の2セッションの平均値を個人データとして処理した。

3.1 照度レベルによる有彩色成分の変化と個人差

照度レベルに対する12種類の色票の有彩色成分の全被験者の平均値を Fig. 1 に示す。その結果、どの色票の場合でも照度レベルが上昇すると、10lx までは、色票の色の見えの有彩色成分の増加の程度が大きく、それ以上の照度になると有彩色成分の増加の程度が鈍る傾向にあった。そこで、各色票別に個人差を調べるために有彩色成分の標準偏差を求めた。その結果を Fig. 2 に示す。その結果、個人差については、照度レベルの低い0.1lx においてとくに大きく、10lx と 1000lx ではその差が小さくなった。そして、色票別では、R の色票の照度レベルによる個人差の変化が目立った。これは、照度レベルに対する明るさの変化の割合が最も多く、さらに、低照度になると黒みが増すことによる評価の難しさが、個人差を大きくしたものと考えられる。

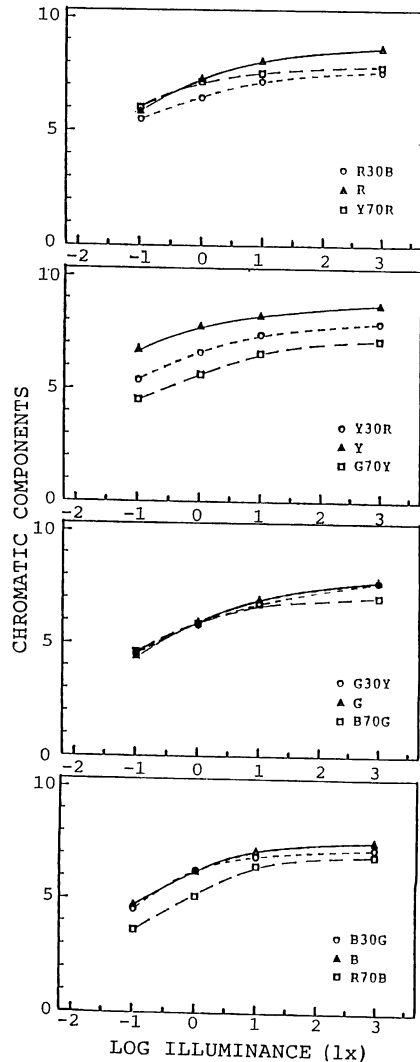


Fig. 1 Average chromatic components of 50 subjects for log illuminance.

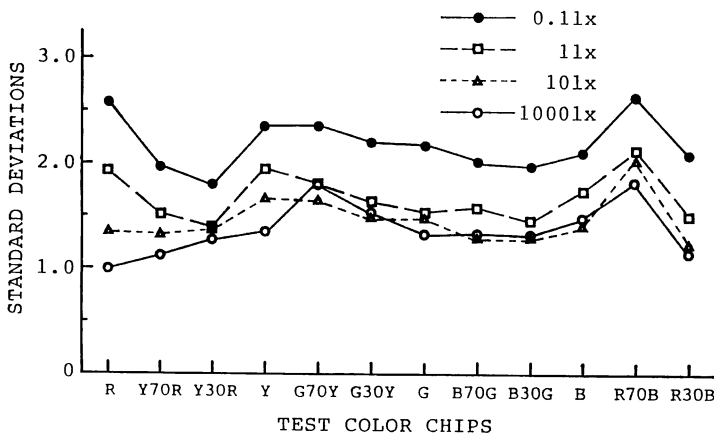


Fig. 2 Standard deviations of 50 subjects for chromatic components. Each symbol represents the illuminance levels for the 0.1lx (●), 1lx (□), 10lx (△) and 1000lx (○).

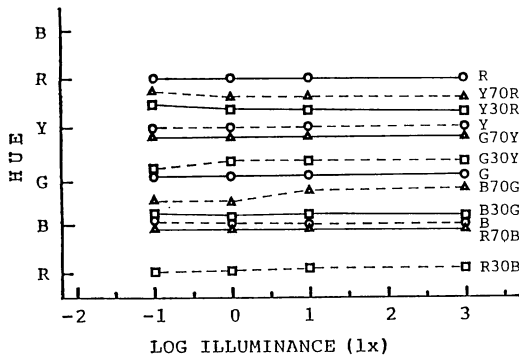


Fig. 3 Average apparent hue of 50 subjects for log illuminance.

3.2 照度レベルによる色相の変化と個人差

照度レベルに対して、12種類の色票の見えの色相の全被験者の平均値については、Fig. 3に示すようにB70Gの色票で、10lx以下に照度レベルが低下すると、その色相が青色の方向にシフトした。他の色票については、1lx以下の照度レベルでやや色相の変化が見られる程度で、1lx以上の照度レベルにおいては色相の変化が生じなかった。しかし、この照度レベルによる色相の評価については、色票の種類によって個人差が大きく異なった。Fig. 4に色票別とその個人差を標準偏差で示す。この標準偏差 SDの算出法は次式により行った。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (1)$$

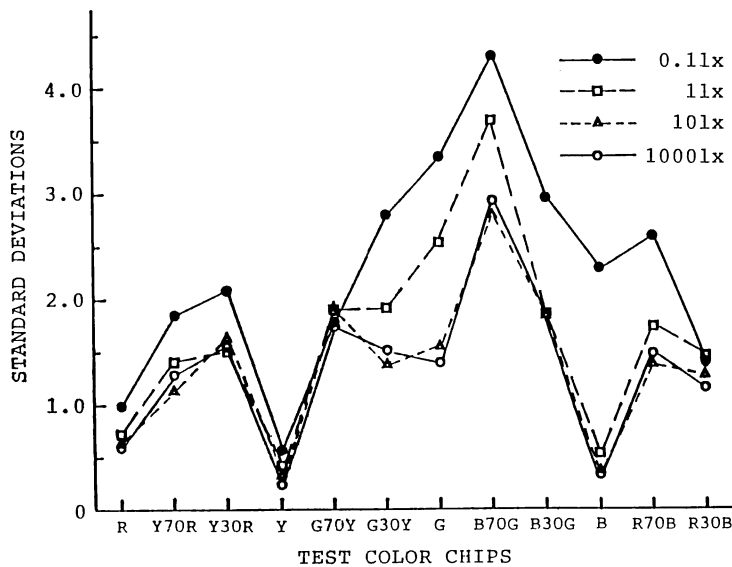


Fig. 4 Change of apparent hue with the illuminance level.

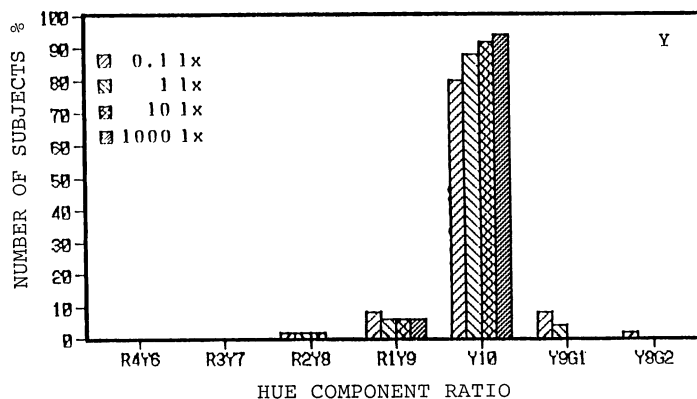


Fig. 5 Relation between the number of subjects and the hue component ratio for a test color chip Y.

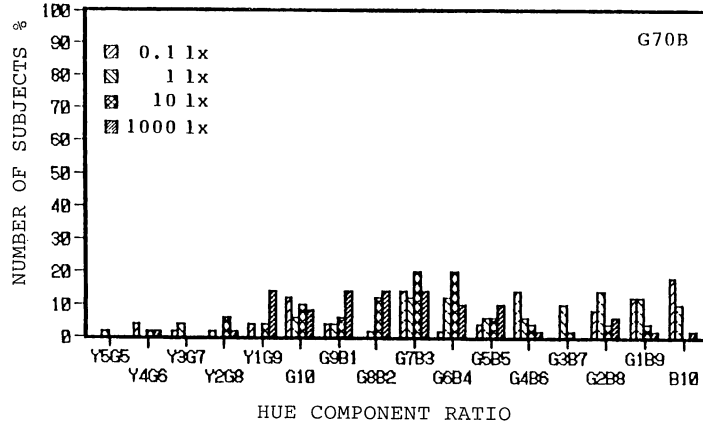


Fig. 6 Same as Fig. 5 but for a test color chip G70B.

ここで、 N は被験者数、 x_{ij} は各被験者の色相の成分比、 \bar{x}_j は全被験者の色相の成分比の平均値を示す。色相の成分比は、R, Y, G, B の1色または、2色の配分比を示す。

この結果から、色票R, Yについては、個人差の照度レベルによる影響が小さく、とくに色票Yについての個人差の小さいことがわかる。そして、色票Bについても1lx以上の照度レベルでは、非常に個人差の小さいことが示された。しかし、緑成分を含む色票については、照度レベルが1000lxの場合においても個人差が大きく示された。以上の結果の中から、標準偏差の最も小さいYの色票と最も大きいG70Bの被験者の分布を示すとFig. 5, Fig. 6のようになる。横軸の色相成分比は、たとえば、Fig. 5の場合、R1Y9となっているのは、R成分が1, Y成分が9を表している。結果より、色票Yの1000lxにおいては、96%の被験者がY成分を10と評価しており、R1Y9と評価している者を加えると100%となって、この色の見えの色相については、非常に個人差の小さいことがわかった。それに対して、G70Bについては、照度レベルが1000lxの場合でもすべての成分比で20%以下の分布となっており、非常に個人差の大きいことが示された。このG成分を含んだ色票の個人差の大きい要因として Boynton ら⁵⁾, Uchikawa ら⁶⁾, Montag ら⁷⁾ が測定した、カテゴリーカル的な11種類の基本色を用いた評価方法では、個人差が小さく示されているが、ここでは、色の見えの色相をNCSやMunsell色空間のような連続的な変化量としてとらえたためと、緑の成分を含んだ色票については、その分光反射率が青や黄成分も含んでいることや、RやYの色票と比較して彩度がやや低いことなどの影響が考えられる。

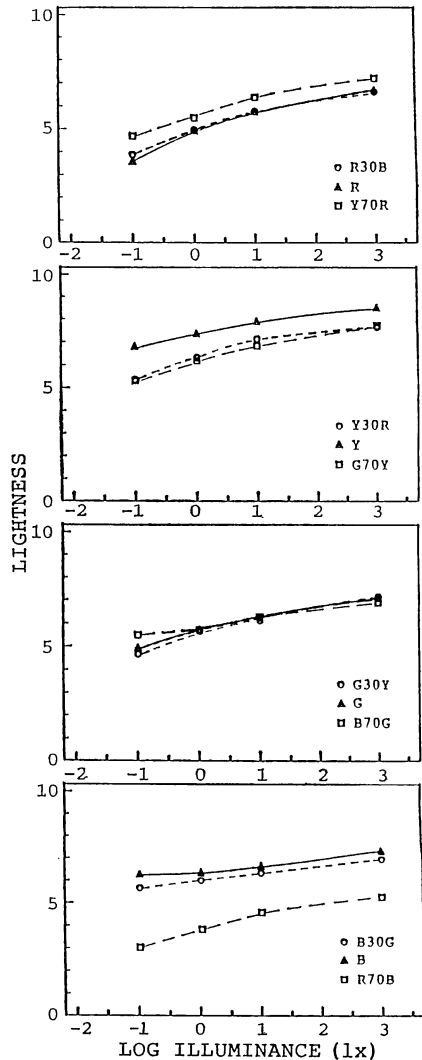


Fig. 7 Average apparent lightness of 50 subjects for log illuminance.

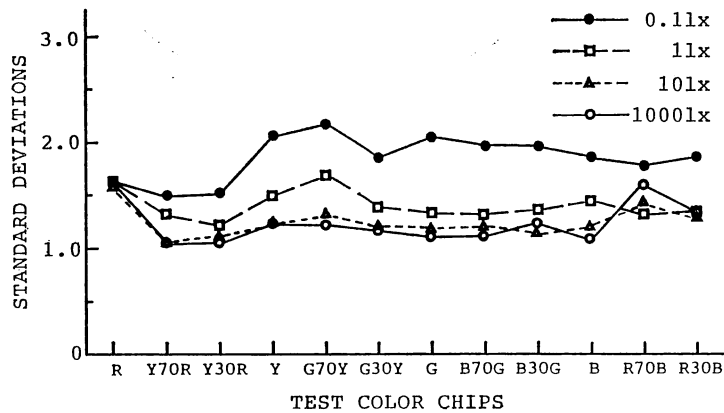


Fig. 8 Change of apparent lightness with the illuminance level.

3.3 照度レベルによる明度の変化と個人差

照度レベルに対する各色票の全被験者の平均値については、Fig. 7 に示すように赤成分を含んだ色票 R, Y70R, Y30R, R70B, R30B の照度レベルによる明度の変化が大きく示されたが、青成分を含む B70G, B30G, B の色票については、その変化が小さく、とくに、B の色票については、0.1lx と 1lx における明度がほぼ一致しており、低照度における桿体の作用による明るさへの寄与が示された。そこで、各色票別にその個人差を調べるためにその標準偏差を求めた。その結果を Fig. 8 に示す。結果より、個人差については、R の色票で照度レベルに関係なくほぼ同じ値が示されているが、ほとんどの色票で照度レベルの低いほうの標準偏差の大きいことがわかった。色票別では、R および R70B を除いて色票の種類による差は小さく、この評価については、色の種類による被験者間のばらつきはほぼ同じであるといえる。

なお、各被験者による明度の評価と色みの強さとの関係について、その相関を求めてみたが、本実験の範囲においては、とくに顕著な相関はみられなかった。

3.4 色の見えの要因分析と個人差

色票の種類に違いによる有彩色成分、色相、明度の照度レベルによる変化とその個人差が示されたが、色の見えの個人差が、どのような要因によっているかを、主成分分析⁸⁾することによって、その主成分を抽出した。

これは、与えられた多くの変量の値を、一つまたは少数個の主成分で説明しようとするものであり、 p 個の変数 x_1, x_2, \dots, x_p があるとすると、それを式(2)に示すように、 m 個の総合特性 z_1, z_2, \dots, z_m (第1, 第2, ..., 第 m 主成分) に要約する手法である。

Table 2 Eigenvalues and proportions of the chromatic components.

Principal component No.	Eigenvalue	Proportion
1	7.04	0.587
2	1.33	0.112

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p \\ z_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2p}x_p \\ &\dots\dots\dots \\ z_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mp}x_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

本実験の結果の処理は、色み最も高い 1000lx の照度レベルのときの、12 種類の刺激の 50 人の評価結果を標準化して、相関行列の固有値問題の解から主成分を求めた。

さらに、有彩色成分、色相、明度における各被験者の分布を調べるために、抽出された各主成分の得点を求めた。その方法として、たとえば、 h 番目の被験者の第1主成分得点を z_{hi} とすると、 z_{hi} は、

$$z_{hi} = a_{i1}x_{h1} + a_{i2}x_{h2} + \dots + a_{ip}x_{hp} - (a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ip}x_p) \quad (3)$$

によって求められる。ここで、 x_1, x_2, \dots, x_p は各変数の平均値である。同様にして、各被験者の主成分得点を求めた。

3.4.1 有彩色成分の要因分析

Table 2 に色みの主成分の固有値と寄与率を示す。固有値が 1.0 以上は第2主成分までであるので、ここでは、第2主成分までを取り上げる。第1, 第2主成分の固有ベクトルを各色票別に示すと Fig. 9 のようになる。第1主成分は、色票の種類に関係なく主成分の値が正となり、しかも、それらの値の差が小さいので、これ

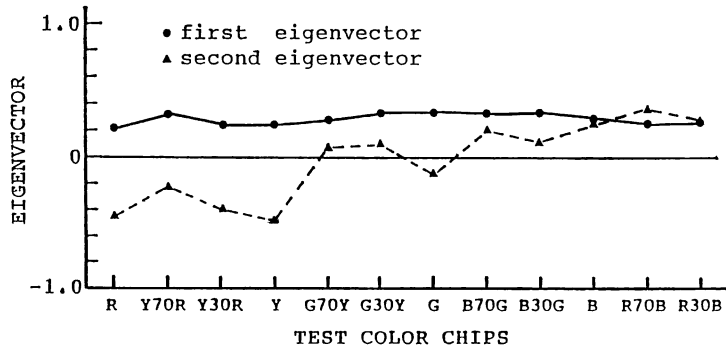


Fig. 9 Eigenvector of chromatic components for 12 test color chips.

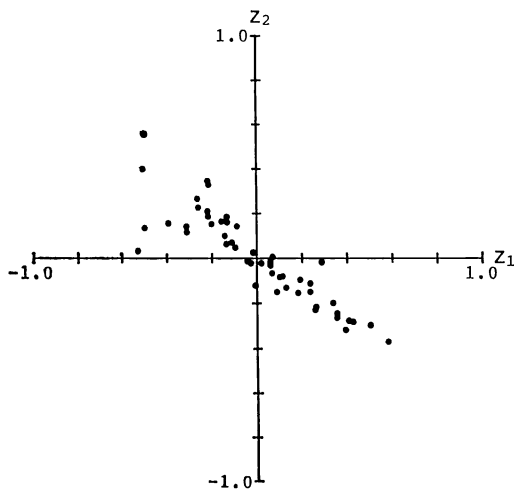


Fig. 10 Location of principal component scores, for each of 50 subjects, obtained by principal component analysis for chromatic components. The horizontal axis is first component, the vertical axis is second component.

は、有彩色成分の大きさを表す主成分と解釈される。そして、その寄与率は 58.7% と第 1 主成分の寄与の大きいことがわかる。第 2 主成分は、青成分を含む色が正、R, Y70R, Y30R, Y の色票が負を示しているの、これは、色の種類による有彩色成分の違いを表す成分と解釈されるが、第 1 主成分と比較して、その寄与率が 11.2%と低いので、有彩色成分の大きさは、その色票の彩度が最も強く影響し、色の種類が異なっても、その有彩色成分に対する寄与は小さいと考えられる。

次に、各被験者の分類を行うために、第 1, 第 2 主成分得点を求めた。Fig. 10 にその散布図を示す。その結果、第 1 主成分は、Fig. 9 に示すように色の種類に関係なく、有彩色成分の大きさを表す主成分であるので、

+側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、色みを強く感じている人の分布を示し、-側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、色みを強く感じない人の分布を示すものと解釈できる。第 2 主成分は、Fig. 9 で、青成分を含む色票の固有ベクトルが正であったので、+側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、青成分を含む色票の色みを、相対的に強く感じる人と解釈でき、赤および黄成分の色票の固有ベクトルが負であったので、-側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、赤および黄成分を含む色票の色みを、相対的に強く感じる人の分布を表すものと解釈できる。そして、第 1 主成分と第 2 主成分の関係について、第 1 主成分の+側の数値が大きく、しかも、第 2 主成分の-側の数値の大きい被験者は、赤および黄成分の色みを強く感じたと考えられる。

3.4.2 色相の要因分析

Table 3 に色相に対する主成分の固有値と寄与率を示

Table 3 Eigenvalues and proportions of the apparent hue.

Principal component No.	Eigenvalue	Proportion
1	2.50	0.208
2	1.89	0.157
3	1.56	0.130
4	1.27	0.106

Table 4 Eigenvalues and proportions of the apparent lightness.

Principal component No.	Eigenvalue	Proportion
1	7.63	0.636
2	1.17	0.097

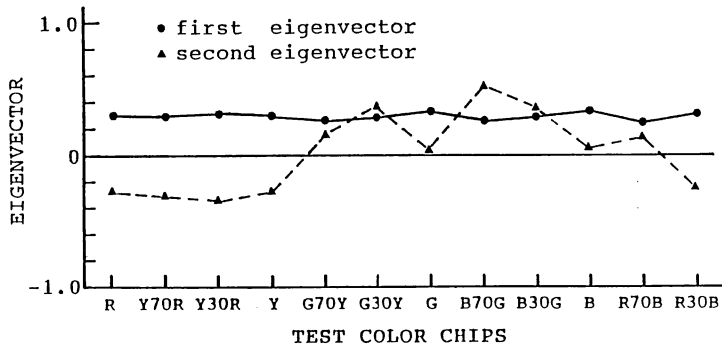


Fig. 11 Eigenvector of apparent lightness for 12 test color chips.

す。この色相に対する主成分の固有値が、1.0 以上は第4主成分までであり、その累積寄与率も 60.1% と低いので、これは、Fig. 4 の結果に示すように、色票の種類別による個人差の大きさが顕著に示された。

したがって、この色相の要因についての、はっきりとした主成分を抽出することはできなかった。

3.4.3 明度の要因分析

Table 4 に明度に対する主成分の固有値と寄与率を示す。固有値が 1.0 以上は、第2主成分までであるので第2主成分までを取り上げる。Fig. 11 にその固有ベクトルを各色票別に示す。第1主成分は、色票の種類に関係なくこの主成分の値は正となり、それらの値の差が小さいので、明度の成分の大きさを表す主成分と解釈される。そして、その寄与率が 63.6% と明度に対する寄与の大きいことがわかる。第2主成分は、GまたはBを含む色票で正、RまたはYを含む色票で負を示している。これは、色の種類による明度の違いを表すものと解釈できるが、その寄与率が 9.7% と低く、色の種類が異なっても、その差は小さいと考えられる。

次に、各被験者の分類を行うための第1、第2主成分得点の散布図を Fig. 12 に示す。第1主成分は、色の種類に関係なく、明度の成分の大きさを表す主成分であるので、+側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、明度を高く評価している人の分布を示し、-側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、明度を低く評価している人の分布を示すものと解釈できる。そして、第2主成分については、+側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、緑および青成分を含む色の明度を相対的に高く評価し、-側の数値の大きい者ほど、全被験者の平均値より、赤および黄成分を含む色の明度を相対的に高く評価する人の分布を示していると解釈できる。そして、第1主成分と第2主成分の関係につ

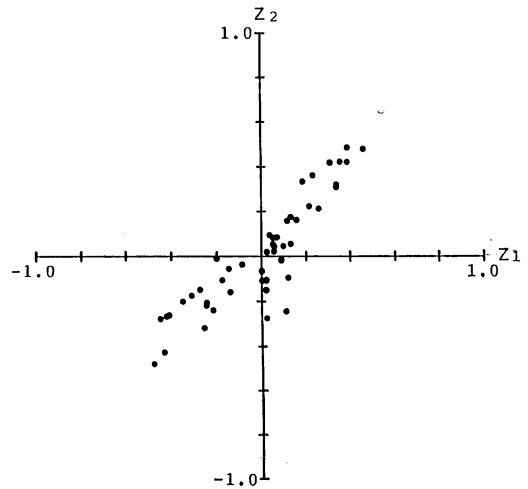


Fig. 12 Location of principal component scores, for each of 50 subjects, obtained by principal component analysis for apparent lightness. The horizontal axis is first component, the vertical axis is second component.

いては、第1主成分の+側の数値が大きく、しかも、第2主成分の+側の数値の大きい被験者は、緑および青成分を含む色票の明度を高く評価したものと考えられるが、第2主成分の寄与率が非常に低いので、色票の種類による差は小さいと思われる。

4. おわりに

本研究では、照度レベルによる表面色の色の見えの変化と個人差を調べ、色情報伝達における基礎的データを求めることを目的として実験を行った。

その結果、有彩色成分は、照度レベルが 10 lx までは、その成分の増加の程度が大きく、10 lx と 1000 lx では、その差が小さく示された。そして、照度レベルの

低下にもなって個人差が大きくなったが、色票の種類による差はほとんど見られなかった。色相については、色票の種類による差が非常に大きく、R、Yの色票については、照度レベルに関係なく個人差が小さく、Bの色票についても1lx以上の照度レベルになると、R、Yの色票と同様に個人差が小さく示された。それに対して、G成分を含む色票については、個人差が非常に大きくなることがあきらかとなった。明度については、赤および黄成分を含む色票の照度レベルによる変化が大きく示されたが、青成分を含む色票については、低照度になっても桿体の作用によって明度の低下がほとんど示されなかった。そして、個人差は照度レベルの低下にもなって大きくなった。

最後に、本研究に関してご助言を賜った東京工業大学総合理工学研究科池田光男教授、および被験者として協力していただいた方々に深く感謝いたします。

文 献

- 1) R. W. G. Hunt: "The specification of colour appearance. I. Concepts and terms," *Color Res. Appl.*, **2** (1977) 55-68.
- 2) R. W. G. Hunt: "The specification of colour appearance. II. Effects of changes in viewing conditions," *Color Res. Appl.*, **2** (1977) 109-120.
- 3) 湯尻 照: "照度レベルによる表面色の色の見えの変化: 刺激サイズの影響", *光学*, **19** (1989) 97-104.
- 4) JIS Z 8723-1988: 表面色の視感比較方法.
- 5) R. M. Boynton and C. X. Olson: "Locating basic colors in the OSA space," *Color Res. Appl.*, **12** (1987) 94-105.
- 6) K. Uchikawa and R. M. Boynton: "Categorical color perception of Japanese observers: comparison with that of Americans," *Vision Res.*, **27** (1987) 1825-1833.
- 7) E. D. Montag and R. M. Boynton: "Rod influence in dichromatic surface color perception," *Vision Res.*, **27** (1987) 2153-2162.
- 8) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正: 多変量解析法 (日科技連出版社, 東京, 1975) pp. 159-258.