

研究

色票の色の見えの輝度レベルによる変化

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

(1988年10月24日受理)

Color Appearance of Surface Colors for Various Luminance Levels

Akira YUJIRI

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

Color appearance for 12 test color chips at 10 different luminance levels was investigated by the color-naming method. Color appearance was evaluated with the chromatic to achromatic component ratio, the hue component ratio, and the perceived lightness. The relation between chromatic components to logarithmic luminance was represented as a hyperbolic function. It was observed that the perceived hue of green and greenish blue test color chips shifted toward blue, and the perceived lightness decreased with a decrease of luminance.

1. はじめに

明所視領域から暗所視領域までの広範囲にわたる物体色の色の見えが、どのように認識されているかを解明することは、応用分野を考慮しても重要な課題である。たとえば、われわれが、屋外で見ている標識の色が、昼間から夜間にかけて変化して見えることは日常よく経験することであり、このことは、間違った情報を伝達することにもなりかねない。したがって、明るさのレベルによって色の見えを予測することができれば、このような間違った情報伝達をなくすことが可能である。さらに、明るさのレベルに対して色覚の感度がどのように変化しているかの解明ができれば明るさの変化に対する色知覚の評価システムを予測することが可能となる。

Hunt^{1,2)} はこのような明るさのレベルによって変化する色の見えを colourfulness という表現を用い、色票の照明レベルを低くした場合にその colourfulness が減少すると報告している。すなわち、照度レベルが低くなると色票の見えのあざやかさが減ってきて、色みの成分が少なくなり、colourfulness が減少すると解釈できる。さらに、彼³⁾ は、暗所視から薄明視、明所視における物体色と光源色の colourfulness を背景の異なる条件のもとで予測できるようにした。芦澤⁴⁾ らは、照度レベルを変化させたときの色の目立ちについて測定した結果、周

囲が暗くなっていくと錐体の明るさの感度の低下とは別に色みが減少し、その現象は Hunt の言う colourfulness に相当すると説明している。これらの研究は、明るさを変化させたときの色みの程度、あるいは見えのコントラストを捕らえたものが中心である。また、その他、薄明視領域を含めた色の見えに関する研究は、重要な課題でありながらほとんど見当たらない。したがって、今後は、薄明視領域における色相変化を含めた色の見えの現象を探求することが必要である。

そこで、本論文では、明るさの変化に対する色知覚のシステムを構築するための手がかりとして、色票の輝度レベルを広範囲に変化させたときの色の見えを、カラーネーミング法^{5,6)} を応用して測定し、輝度レベルに対する色票の色の見えについて考察した。

2. 実 験

2.1 実験装置

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、その面に向けて光源を配置した。試料光源は、高演色 AAA 形昼白色蛍光ランプを用い、その照明特性は、相関色温度 5000 K、平均演色評価数 Ra 99 である。そして、刺激として色票を用い、その色票面の輝度調整は、光源の点灯

数および光源の前に設置したスクリーンによりその発光面積を変えることによって行なった。

2.2 実験条件

テスト刺激として、NCS 表色系⁷⁾の色相環から反対色相 R-G, Y-B を含む 12 種類の色票を選定した。選定した色票の NCS 表示とマンセル表示を **Table 1** に示す。ここで、NCS の表示方法として、たとえば、No. 2 の 0090-Y 70 R の色票は、白み 10・黒み 0・色み 90 で原色の Y (黄) と R (赤) の構成比が 30 : 70 であることを示す。色票の選定は、明るさのレベルによってその色の見えが大きく変化すると予想される純色に近い色とした。そして、その色票の大きさは、背景 N6 のマスクによって 10 cm 角の正方形となるようにした。

われわれの眼は、視環境の照度レベルによって、その明るさに順応する程度は異なるが、ここでは、色票の種類が異なったときの色票面の明るさを同一にすることが

Table 1 NCS notations and Munsell notations of test color chips.

No.	NCS notation	Munsell notation
1	1090-R	4.6 R 4.2/14.3
2	0090-Y 70 R	9.9 R 6.0/13.6
3	0090-Y 30 R	6.4 Y R 7.2/13.4
4	0080-Y	4.5 Y 8.4/12.7
5	1080-G 70 Y	2.2 G Y 7.1/10.4
6	1080-G 30 Y	8.2 G Y 5.9/12.3
7	2070-G	4.2 G 5.0/10.8
8	2060-B 70 G	4.2 B G 5.1/10.0
9	2060-B 30 G	0.6 B 5.1/ 9.2
10	1070-B	9.5 B 5.1/11.2
11	2070-R 70 B	8.0 P B 3.6/11.3
12	1060-R 30 B	4.9 R P 4.5/13.9

できないため、現行の測光量の輝度を同一にしたときの色の見えの測定を行なった。そのときの色票面の輝度と照度を **Table 2** に示す。

観測距離は、錐体および桿体視細胞の作用を考慮して、色票の大きさが 10° 視野となるように色票からの距離を 57 cm とした。

2.3 評価方法

色票の色の見えが、輝度レベルによってどのように変化するかをカラーネーミング法を応用して測定した。

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」*1 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明度で評価した。

2.4 実験手続

被験者は、実験開始前に暗順応時間を 10 分以上とり、その後、試料光によって、背景と同じ N6 の無彩色の色票面の輝度が 0.0006 cd/m² に照明された面に 2 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、色の見えを測定した。そのとき、観測時間は制限しなかった。そして、色票の種類を変えるたびに、色票の輝度を 0.0006 cd/m² になるように調整した。そして、その後、同様にして低

*1 色光の場合は、色みの成分と白みの成分で区分できるが、物体色の場合は、黒みが加わるので、ここでは、色みを有彩色成分 (chromatic component)、白みと黒みを合わせたものを無彩色成分 (achromatic component) とした。

Table 2 Luminance and illuminance on the test color chips.

Luminance (cd/m ²)	Illuminance (lx)											
	R	Y70R	Y30R	Y	G70Y	G30Y	G	B70G	B30G	B	R70B	R30B
0.0006	0.016	0.007	0.005	0.003	0.004	0.007	0.010	0.010	0.010	0.011	0.024	0.012
0.0025	0.062	0.028	0.020	0.013	0.018	0.026	0.040	0.041	0.043	0.044	0.095	0.050
0.01	0.248	0.112	0.076	0.051	0.070	0.105	0.157	0.160	0.163	0.170	0.349	0.212
0.04	0.918	0.425	0.272	0.194	0.264	0.412	0.611	0.632	0.653	0.686	1.37	0.779
0.16	3.83	1.68	1.07	0.75	1.06	1.58	2.34	2.39	2.59	2.71	5.43	3.18
0.64	15.7	6.58	4.18	2.91	4.12	6.42	9.55	9.88	10.2	10.8	21.2	13.1
2.56	63.9	27.2	16.7	11.6	16.1	24.0	35.1	37.1	40.4	43.1	85.0	52.4
10.24	244.0	101.0	66.4	46.1	66.3	99.5	142.0	149.0	153.0	169.0	328.0	204.0
40.96	961.0	413.0	260.0	183.0	251.0	382.0	546.0	561.0	621.0	680.0	1356.0	748.0
61.50	1355.0	629.0	380.0	276.0	366.0	576.0	834.0	855.0	933.0	1020.0	1707.0	1185.0

輝度から高輝度へと順次変化させて実験を行なった。したがって、調整時間を含めると順応時間は十分であると思われる。

2.5 被験者

被験者は、色覚正常な男性4名である。

3. 結 果

3.1 輝度レベルによる有彩色成分と無彩色成分の成分比

輝度レベルによって、有彩色成分の割合がどの程度変化したかの4名の被験者の実験結果を Fig. 1 に示す。

これは、5回分の実験結果を平均したものである。

Rの色票の場合、被験者間の差はあるが、4名の被験者ともに同様な傾向を示しており、薄明視領域においては、その割合が $\log L$ に対してほぼ直線的に増加し、明視領域においては、その増加の程度が少なくなることがわかる。そして、輝度が高いときには有彩色成分の割合が非常に大きくなり、この色票については、明視領域において無彩色成分がほとんどないことを示している。

Y 70 R, Y 30 R, Y, G 70 Y, G 30 Y, G の色票についても R の色票と同様な結果となっているが、R の色票

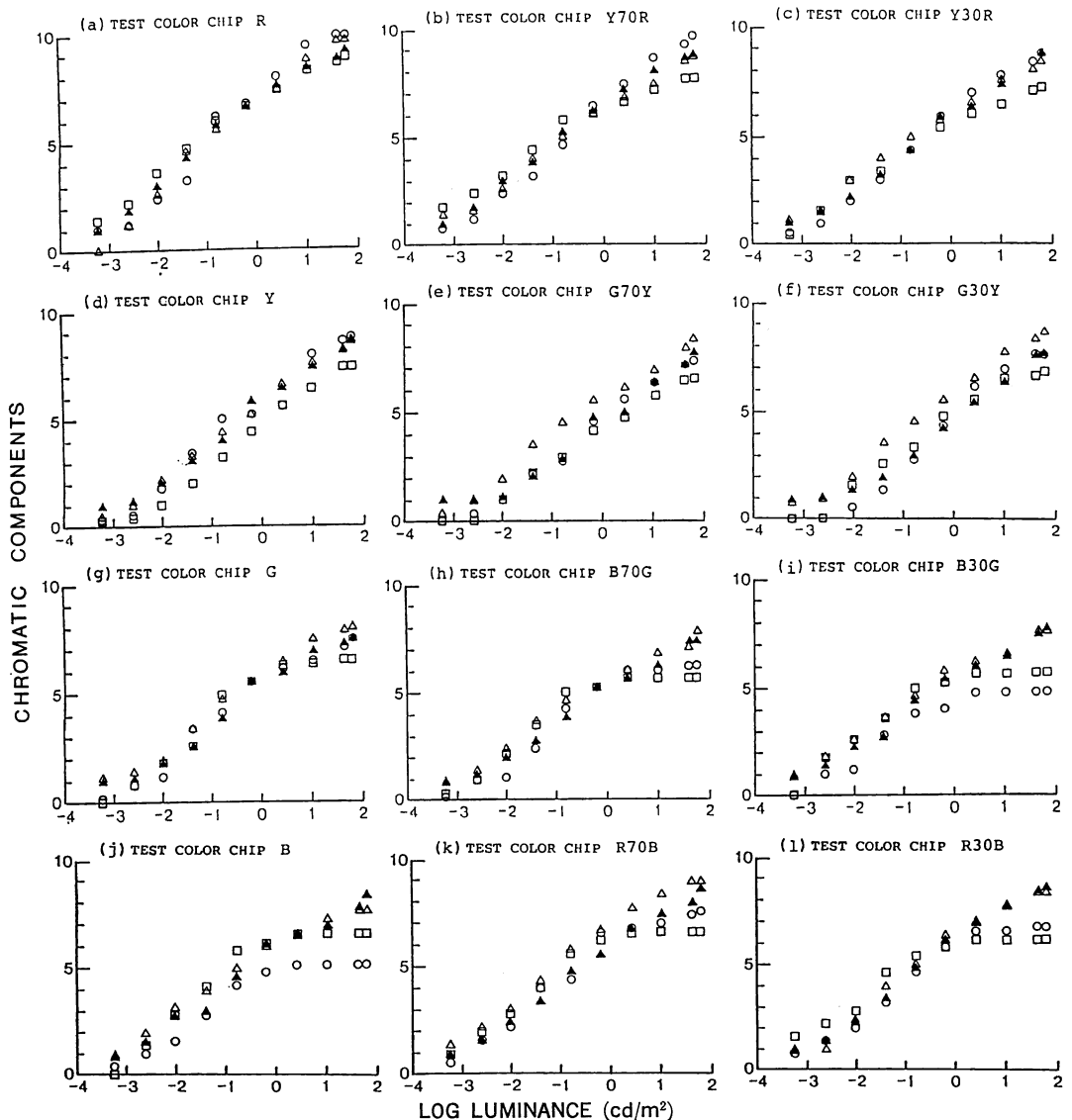


Fig. 1 Relation between chromatic components and log luminance. The data points show the experimental results. Subjects; \circ : MI, \blacktriangle : MT, \triangle : KF, \square : AY.

より有彩色成分の割合がやや少ない結果となっている。

それに対して、B 30 G, B, R 70 B, R 30 B の青成分を含んだ色票については、被験者 MT, KF が、他の色票と同様な結果であるのに対して、被験者 MI, AY の場合に、色票の輝度が 2.56 cd/m^2 以上の明所視において、有彩色成分の割合がほとんど一定となっている。

3.2 輝度レベルによる色相変化

Fig. 2 は、輝度レベルに対して各色票の色相がどのように変化したかを図示したもので、図中、輝度が 0.025 cd/m^2 以下においてデータの無いところは、有彩色成分を 0 と評価した場合である。

色相の変化は、4 人の被験者ともに同様な傾向を示しており、ユニーク色である R, Y, B の色票については、輝度レベルによる色相の変化はほとんどなく、薄明視領域においても色相はほぼ一定であることを示している。

同じユニーク色でも G の色票の場合には、輝度レベルによって色相が変化している。被験者 MI は、薄明視領域になると急激に色の見えが変化し、 0.01 cd/m^2 において色票 B と同じ見えになっていることを示している。被験者 MT は、明所視領域で G 10 と評価しているが、 0.65 cd/m^2 以下になると色の見えが変化し、 0.01 cd/m^2 においては、G 成分が約 6.5, B 成分が約 3.5 の割合ま

で変化していることがわかる。被験者 KF は、 0.04 cd/m^2 以上では、G 成分を 10 と評価しており、それ以下にならないと B 側にシフトしない。この被験者は、色の見えの色相変化に対する輝度レベルの影響が少ないことを示している。被験者 AY は、 0.64 cd/m^2 以下になると徐々に B 側にシフトし、 0.01 cd/m^2 では、被験者 MT と同様に G 成分が 6.5, B 成分が 3.5 の割合まで変化している。

このように輝度レベルが低くなると、見えの色が B 側にシフトする傾向は、G 30 Y, B 70 G および B 30 G の色票についても同様で、このことは、緑の成分を含んだ色票は、薄明視領域になると色の見えが青色のほうにシフトするということがいえる。

3.3 輝度レベルによる明度の変化

輝度レベルによって色票の明るさがどの程度変化したかを Fig. 3 に示す。ここでは、色票がユニーク R, Y, G, B における 4 人の被験者の結果を示すが、縦軸は、その色票を観測したときの明るさの程度を明度の絶対評価で示したものである。

輝度レベルによって、明度が最も大きく変化したのは R の色票で、輝度が 0.0006 cd/m^2 と 61.5 cd/m^2 では、各被験者ともに約 4 ほど変化しており、プルキンエ現象

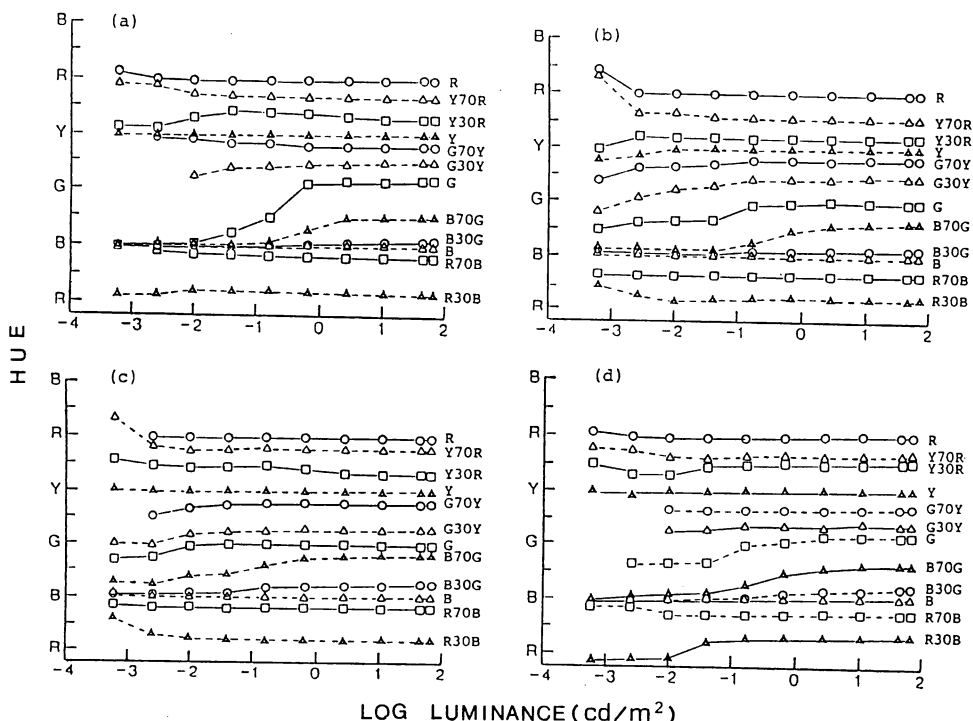


Fig. 2 Relation between apparent hue and log luminance. Test color chips are indicated right side of the figure. Subject: (a) MI, (b) MT, (c) KF, (d) AY.

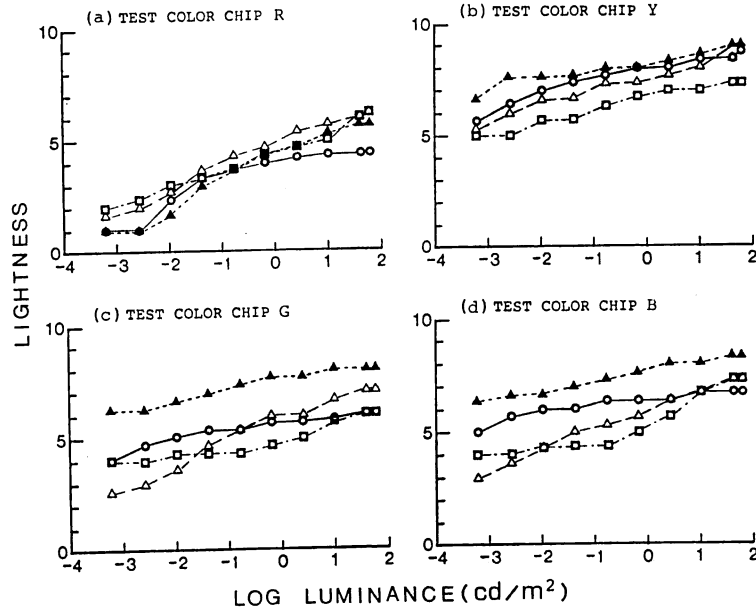


Fig. 3 Relation between apparent lightness and log luminance. The data points show the experimental results. Subjects; ○: MI, ▲: MT, △: KF, □: AY.

が顕著に現われていることがわかる。また、Yの色票を除いて 2.56 cd/m^2 以上の明所視レベルでは、Table 1の明度に相当するマンセル表示のバリューよりほとんど明るく評価しており、色票の色成分が明るさの判断に加わったといえる。Yの色票については、明所視レベルでも輝度が高くなるとマンセルバリューと一致しない。

個人差については、被験者 MT が、GおよびBの色票を他の被験者よりかなり明るく感じており、被験者 KF は、明るさの評価が輝度レベルによって大きく影響を受けていることがわかる。このように、明るさの評価については、個人差の大きいことが示された。

4. 考 察

輝度レベルを変化させたときの色票の有彩色成分の割合については、Fig. 1に示したように非常に大きく変わってくる。そして、その変化は薄明視領域において顕著であり、明所視領域においては、その割合の変化が少なくなっている。そこで、輝度レベルに対する有彩色成分の割合を推定すると、次式のように双曲線関数で表現できる。

有彩色成分の割合を M_c とすると

$$M_c = a/2 \{ \tanh(b + c \log L) + 1 \} \quad (1)$$

ここで、 a は各被験者の有彩色成分の最大値、 L は色票の輝度、 b と c は推定値の誤差が最小になるように定める関数である。

Table 3 The values of the coefficients, b and c , in Eq. (1).

	b	c
Fig. 3(a)	0.625	0.541
(b)	0.504	0.543
(c)	0.344	0.513
(d)	0.456	0.513

このようにして求めた M_c の値を図で示すと Fig. 4のようになる。そのときの b と c の値を Table 3に示す。これは、被験者 MT による色票 R, Y, G, Bの結果を示すが、実験値と比較してよく一致していることがわかる。その他の特性についても同様な結果を得た。そして、その特性は、薄明視領域では、 $\log L$ に対してほぼ直線的に有彩色成分が増加し、明所視領域において、その増加の程度が鈍るということがわかった。

したがって、錐体の作用による色の見え方において、有彩色成分と無彩色成分の成分比は、薄明視領域において大きく変化し、明所視領域において、その変化の程度が少なくなり、輝度レベルによる有彩色成分の割合は、双曲線関数で線表現できるということが推定できる。

このように輝度レベルに対する有彩色成分の予測については可能になったが、B 70 G, B 30 G, B, R 70 B, R 30 Bの色票については、明所視領域において、被験者 MI, AY の場合に有彩色成分がほとんど一定となって

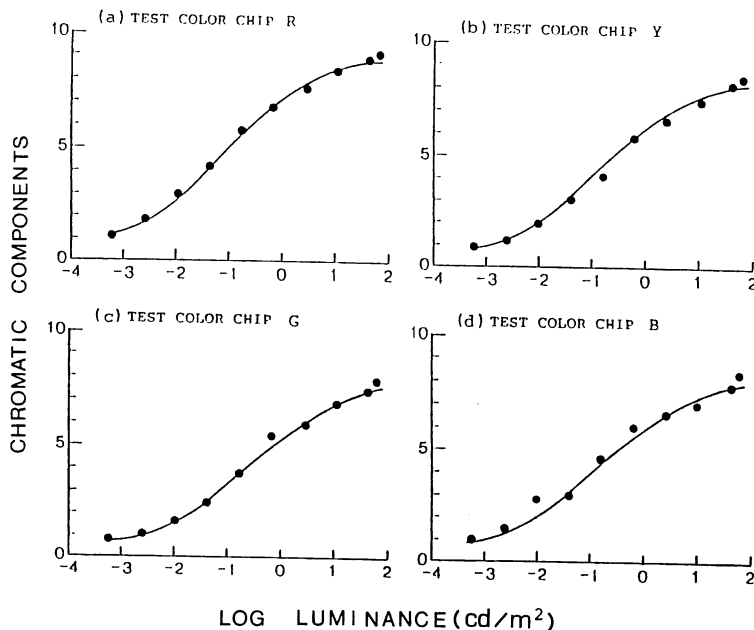


Fig. 4 Relation between chromatic components and log luminance. The data points show the same as in Fig. 1 (a), (d), (g) and (j) for subject MT. The solid lines represent the chromatic components calculated by Eq. (1).

おり、被験者 MT, KF については、明所視レベルでも輝度が高くなるにつれて有彩色成分が増加している。他の色票の結果が、個人差はあっても4人の被験者ともに同じ傾向を示しているのに対し、この青成分を含んだ色票についてのみ異なった特性を示しているのは、本実験による場合、色票の呈示時間を制限しておらず、時間特性の影響を受けたとは思われない。したがって、この青成分を含んだ色票に対する評価が、二つのパターンで示されていることがわかる。すなわち、明所視領域において、青成分を含んだ色に対しては、その有彩色成分の影響度が、大きい被験者と少ない被験者に分かれるということが、この結果から示された。

次に、輝度レベルに対する色相については、Fig. 2の結果に示すように色票の輝度が 2.56 cd/m^2 以上の明所視において、どの色票の場合でも4人の被験者ともに色相はほとんど一定である。そして、色票 R, Y, B のユニーク色については、薄明視領域においても色相の変化はない。したがって、ユニーク色の R, Y, B の色の見えについて、その色相については、明るさの影響をほとんど受けないということが結果から考察できる。しかし、ユニーク色の G については、薄明視領域において低輝度になるにつれて、その色相が徐々に青色のほうにシフトしており、色票 G 30 Y, B 70 G, B 30 G の緑の成分を含む色も同様な傾向を示している。

また、明所視における光源色の色の見えは、輝度レベルに対してその色相が変化するというベズルド・ブリュッケ現象^{8,9)}があるが、ここでは、評価方法としてカラーネーミング法を使用したので、色の対比効果の影響がなく、微妙な色相の変化に気がつかない可能性があるが、本実験の範囲内では、その現象は示されなかった。また、物体色の場合は、非常に高照度で照明したとしても、黒みの成分が減少し、色み、および白みの成分が増加するという現象になり、色相の変化は非常に少ないと思われるが、ここでは、その確認はしていない。

次に、色票の見えるの明るさについては、Fig. 3に示すように、輝度レベルに対する変化が色票の種類によって異なった。Rの色票については、 0.64 cd/m^2 以下の薄明視領域になるとマンセルバリュー 4.2 より暗く評価し、輝度レベルが 2.56 cd/m^2 以上の明所視領域になると明るく評価していることがわかる。すなわち、この色票については、他の色票に比べて、輝度レベルによって明るさの感覚が最も大きく変化し、プルキンエ現象が顕著に現われていることがわかる。そして、明所視領域において、マンセルバリューより高く評価しているのは、明るさ評価に色の効果が加わったものと推定できる。

Yの色票については、輝度レベルによる影響が、Rの色票に比べて少なく、本実験条件の 40.96 および 61.5 cd/m^2 で、被験者 AY を除いてマンセルバリューと同

じかやや高い程度の評価をしている。そして、それ以下になるとすべて低く評価している。このことは、Yの色票については、マンセルバリューが高いために、明るさの評価に対して色の効果がほとんど現われなかったと考えられる。

GとBの色票については、個人差が生じているが、被験者別には、MIを除いてGとBの色票の差はない。被験者MTは、薄明視領域においてもマンセルバリューより約1から2高く評価し、この被験者は、色の効果が明るさの評価に大きく加わっていることを示している。被験者KFは、輝度レベルに対して明度がほぼ直線的に上昇し、この被験者については、輝度の影響を大きく受けていることがわかる。被験者MIについては、とくに薄明視領域においてGよりBの色票のほうを明るく評価しており、桿体の影響を他の被験者より強く受けていると考えられる。被験者AYは、G、Bの色票ともに薄明視領域において明度がほとんど一定で、明所視領域になると明度の増加があり、色の効果が加わってくると推定できる。

これらの明るさの評価については、プルキンエ現象によってRの色票は、薄明視領域で明度が非常に低くなり、GとBの色票については、薄明視領域でも明度の減少が少ないという結果となった。しかし、4人の被験者間でもGとBの色票について個人差がかなりあった。したがって、このことを認識して、今後、色の見えの個人差についても、データを蓄積していく必要がある。

5. おわりに

本研究では、輝度レベルによって物体色の色の見えがどのように変化するかを明らかにすることを目的として実験を行なった。その結果、輝度レベルに対する有彩色成分の割合は、双曲線関数で線表現でき、その特性は、薄明視領域で $\log L$ に対してほぼ直線的に増加し、明所視領域でその増加の程度が鈍るということがわかった。

そして、輝度レベルに対する色相の変化において、ユニーク R, Y, B については、薄明視領域でも色相はほとんど一定であったが、ユニーク G および G 30 Y, B 70 G, B 30 G の緑成分を含む色票については、薄明視領域で青色のほうにシフトすることが明らかとなった。

明るさの評価については、薄明視領域においてプルキンエ現象の影響が大きく示された。そして、Yを除く色票については、色の効果が明るさの評価に加わり、とくに明所視領域においては、マンセルバリューより全体的に高く評価した。また、GとBの色票については、個人差の大きいことが示された。

したがって、以上のような色の見えの評価結果をもとに、今後、個人差の問題も含めて、明るさの変化に対する色知覚システムを構築するための研究を進めたい。

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) R. W. G. Hunt: "A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions," *Color Res. Appl.*, **12** (1987) 297-314.
- 4) 芦澤昌子, 池田光男: "色の目立ちの照度レベルによる変化—実験式の導出—", *照明学会誌*, **72** (1988) 79-82.
- 5) R. M. Boynton, W. Schafer and M. E. Neun: "Hue-wavelength relation measured by colour-naming method for three retinal locations," *Science*, **146** (1964) 666-668.
- 6) 池田光男: *色彩工学の基礎* (朝倉書店, 東京, 1980) pp. 169-179.
- 7) *Svensk Standard*, SS 01-91-02 (1984).
- 8) R. M. Boynton and J. Gordon: "Bezold-Bruke hue shift measured by color-naming technique," *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 78-86.
- 9) J. Larimer, D. H. Krantz and C. M. Cicerone: "Opponent-process additivity-I: Red/Green equilibria," *Vision Res.*, **14** (1974) 1127-1140.