

## 研 究

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

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

(1989年9月13日受理)

Color Appearance of Surface Colors for Various Illuminance  
Levels: Effects of Stimulus Size

Akira YUJIRI

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

Color appearance was measured by a color-naming method for 12 test color chips under various illuminance levels covering 0.01 to 3000 lx. The test color chips were presented in foveal 6', 30', 2° and 10° fields. A gray background of value N6 was used. Color appearance was estimated with the chromatic to achromatic component ratio, the hue component ratio, and the perceived lightness. It was observed that the chromatic components decreased with decreasing of the illuminance and the stimulus size, the perceived hue of green and greenish blue test color chips shifted toward blue in the cases of 2° and 10° fields, but hue of blue test color chip shifted toward green in the case of 6' field, and the perceived lightness decreased with decreasing of the illuminance.

## 1. はじめに

明所視領域から暗所視領域に至る表面色の色の見えは、薄明視領域において大きく変化し、その色の見えの有彩色成分(色み)は、対数輝度に対しほぼ直線的に変化し、さらに、緑成分を含んだ色は、その色相が、明所視から薄明視領域になるにつれて、青色側にシフトする現象がこれまでに示されているが<sup>1)</sup>、そこでは錐体および桿体視細胞の作用を考慮して、刺激サイズの大きさを、10°視野一定で実験が行われている。

しかし、われわれが物を見るときは、いろいろな大きさの物があり、その大きさによって色の見え方が異なる場合がある。たとえば、明所視領域においても、非常に小さい対象物を見る場合、網膜の中心小窩における色の見えは、小視野トリタノピアの現象を示し、黄あるいは青色の方向の彩度が著しく低下することが知られている<sup>2)</sup>。また、Marshall ら<sup>3)</sup>は、刺激の視野サイズが 15°

くらいまでは、そのサイズが大きくなるにつれて、色の飽和度と明るさが増加するということを報告している。

そのほかにも色刺激のサイズによって、色の見えが変化するという研究報告が多くなされている<sup>4-7)</sup>が、いずれも明所視領域において、照度、あるいは輝度一定で測定されたものである。

われわれは視対象を明所視領域のみでなく、薄明視および暗所視領域でも見ることが多くある。さらに、明所視領域においても明るさが増加すると、色の見えも変化することを日常経験する。したがって、このような広範囲の明るさでの色の見えを評価することは、応用分野においても重要な課題である。

そこで、本論文では、テスト刺激の視野サイズを変え、その照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<sup>8,9)</sup>を応用して測定し、照度レベルによる表面色の色の見えの変化が、視野サイズにどのように影響を受けるかについて考察した。

## 2. 実験

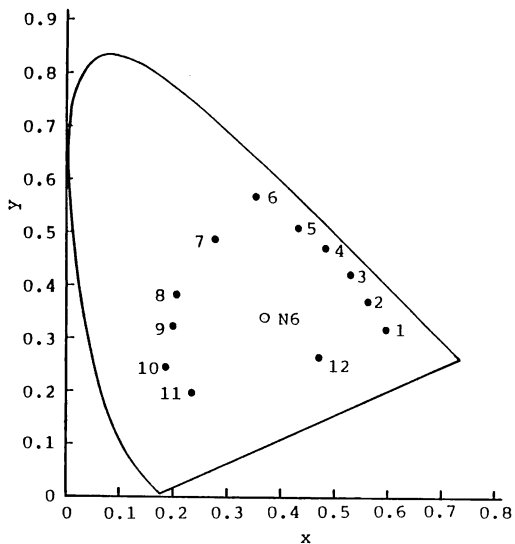
### 2.1 実験装置

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、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 2.6m, 横 2.5m, 奥行き 5m の暗室の一面に高さ 2.3m, 横 2.3m 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 形昼白色蛍光灯ランプで照明した。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

テスト刺激として、NCS 表色系<sup>10)</sup>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, 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  $x, y$  色度座標と視感反射率を **Table 1** に示す。そして、その 12 種類の色票と背景 N6 の CIE-1931  $x, y$  色度座標を **Fig. 1** に示す。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彩度の高い色とした。

テスト刺激の大きさは、そのサイズによる色の見えの変化を調べるために、色票からの距離を 57cm の位置で観測して、6', 30', 2°, 10° 視野となるように、背景 N6 のマスクによって調整できるようにした。この観測



**Fig. 1** CIE 1931 ( $x, y$ ) chromaticity diagram showing location of chromaticity points of 12 test color chips and a N6/background in Experiment.

距離は、テスト刺激のサイズが 10cm 角のとき、10° 視野に相当する。

色票面の照度レベルは、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て、0.01~3000 lx の 12 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

**Table 1** Colorimetric specifications for the 12 test color chips and a N6/background chip in Exp. Colorimetric values  $x, y, Y$  of 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		N6/	0.343	0.352	29.82

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」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 20 分以上とり、その後、試料光源によって、照度が 0.01 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、観測時間は制限しなかったが、刺激サイズが小さくなるほど中心窩で観測するように注意した。その後、低照度から高照度へと順次照度レベルを変化させて、同様にして実験を行った。実験は、予備実験後、1 刺激サイズに対して、12 種類の色票を、0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1.0, 3.0, 10.0, 30.0, 100.0, 300.0, 1000.0, 3000.0 lx の照度レベルで各 1 回ずつ測定し、それを 1 セッションとした。そして、それぞれの刺激サイズに対して 5 セッションの測定を行った。

被験者は、HM (22 歳, 男), AY (45 歳, 男) の 2 名で、いずれも色覚正常者である。

## 3. 結果と考察

本実験では、12 種類の色票を使用して色の見えの有彩色成分、色相、および明度を測定したが、ここでは、照度レベルに対する色の見えの変化について、ほぼその傾向が解釈できると考えられる R, Y, G, B の 4 種類の色票の結果を示しそれについて考察する。

### 3.1 照度レベルによる有彩色成分(色み)の変化

照度レベルに対する有彩色成分の関係を、Fig. 2 に示す。これは、5 回の実験結果を平均したものである。

実験値から、照度レベルが上昇すると、10 lx くらいまでは、刺激サイズが 30', 2°, 10° 視野の色票の色の見えの有彩色成分が非常に増加し、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る。

そこで、照度レベルに対する有彩色成分の割合を、次式的双曲線関数によって表現した。

有彩色成分の割合を  $M_c$  とすると

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

ここで、 $a$  は各被験者の有彩色成分の最大値、 $\log E$  は色票面の照度の対数値、 $b, c$  は推定値の誤差が最小になるように定める関数である。

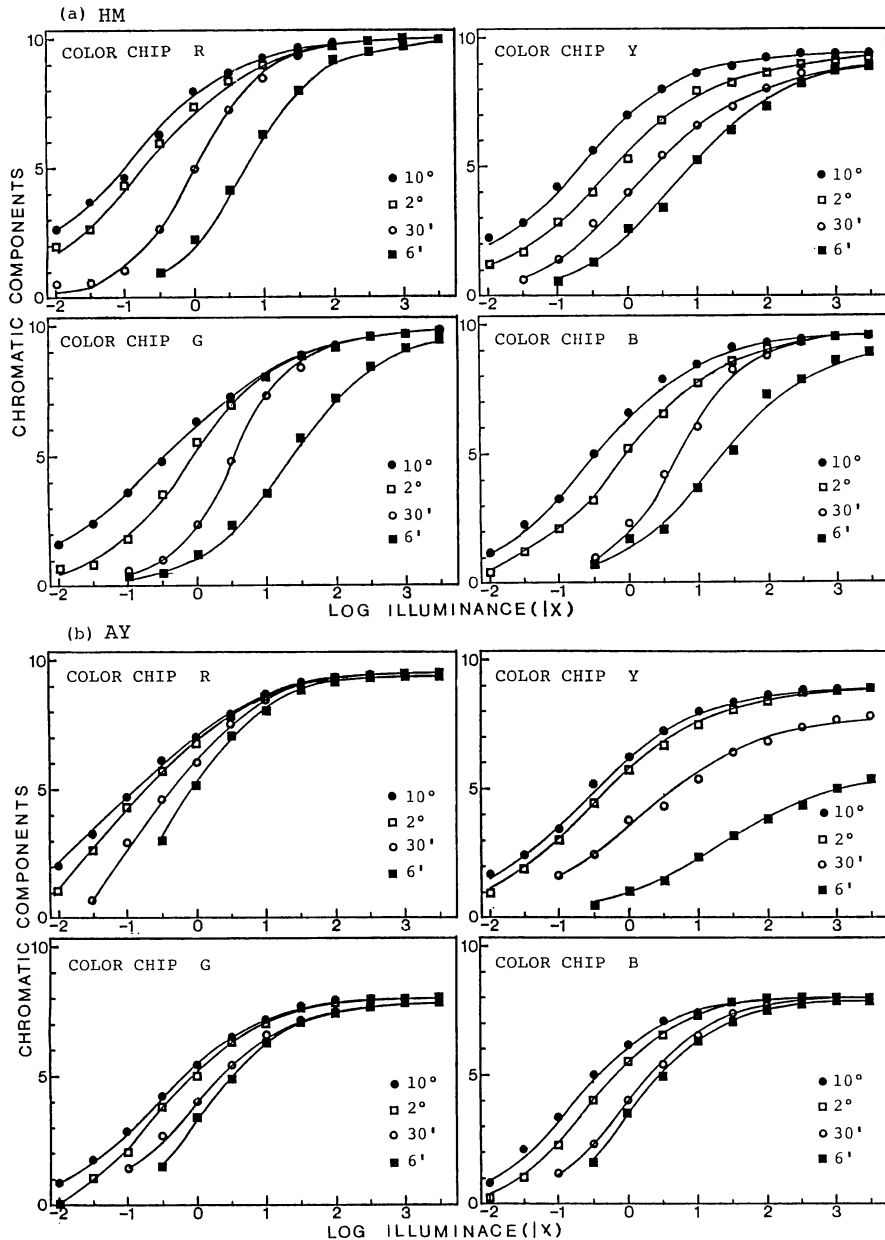
この式によって推定した  $M_c$  の値を示したのが、Fig. 2 の曲線部分である。被験者 HM の場合、R の色票において、100 lx 以上になると、刺激サイズが 30', 2°, 10° 視野では、有彩色成分が一致しており、3000 lx では、6' 視野も含めて同じ値を示している。すなわち、高照度になると有彩色成分の割合が、刺激サイズの影響をほとんど受けないことが示されている。しかし、照度レベルが低くなると刺激サイズの影響が大きくなり、10° 視野に対して 2° 視野では有彩色成分の値がやや小さくなり、30' 視野ではさらに小さくなり、1 lx から 0.3 lx のレベルになると、10° 視野に比較して有彩色成分が約 1/2 の見えになっていることがわかる。さらに、6' 視野ではもっと低くなり、0.1 lx 以下では、色票の認識ができないことが示されている。このことは、刺激サイズの大きさによって網膜を刺激する面積が異なり、照度レベルの減少によって、刺激サイズの小さいものほど錐体の応答の低下が著しく生じたものと考えられる。

Y の色票については、照度レベルが高いときでも刺激サイズによって有彩色成分には少し差が見受けられた。そして、刺激サイズが、30', 6' 視野においては、R や G の色票より照度レベルの減少による有彩色成分の低下の割合がやや小さく示された。

G の色票についても、R の色票と同様な現象が示されており、100 lx 以上になると、30', 2°, 10° 視野の差がなくなり、10 lx 以下では、刺激サイズの影響が顕著に現れているのがわかる。

B の色票については、1000 lx の照度になると、テスト刺激が 30', 2°, 10° 視野では有彩色成分の差がなくなり、6' 視野では有彩色成分がそれよりやや小さくなっていることがわかる。しかし、低照度では、刺激サイズによる差が大きくなり、6', 30' 視野では、0.3 lx 以上でないと色の認識ができないことを示している。

次に、被験者 AY の結果については、被験者 HM と比較して、Y の色票を除いて刺激サイズによる差が小さくなっている。R, G および B の色票の場合、低照度では刺激サイズによる差が生じているが、10 lx 以上ではその差が非常に小さくなっている。すなわち、照度が高くなると、刺激サイズが異なっても有彩色成分の割合は、ほとんど変化しないことを示している。しかし、Y の色票については、高照度でも刺激サイズによる差が顕著に現れている。すなわち、刺激サイズが小さくなると



**Fig. 2** Relation between chromatic components and log illuminance. Each symbol represents the experimental results for the 6' (■), 30' (○), 2° (□) and 10° (●) fields. The solid lines represent the chromatic components calculated by Eq. (1). (a) for subject HM, (b) for subject AY.

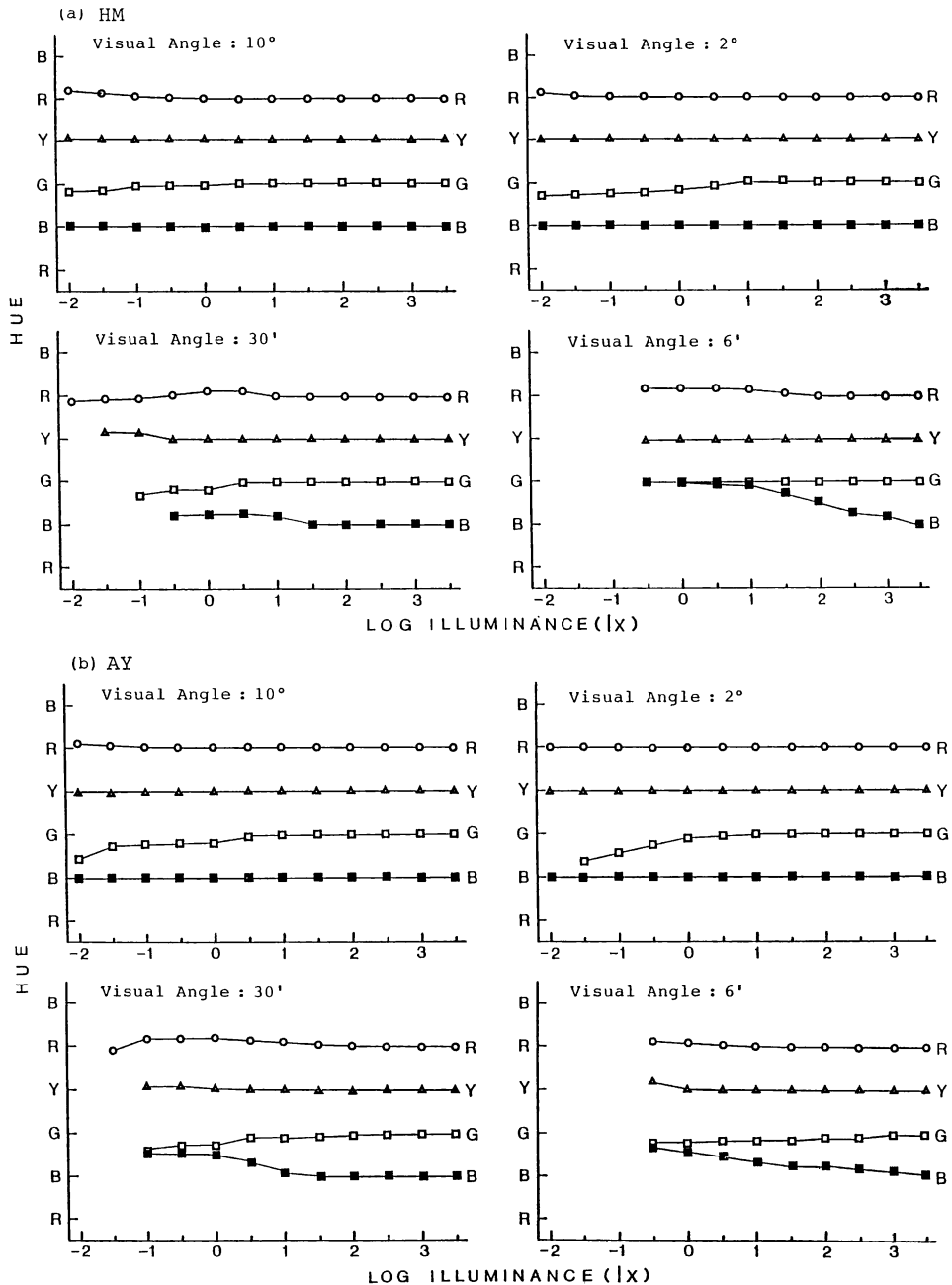
小視野トリタノピアの現象により、Yの色票については、その有彩色成分が減少することを意味している。

### 3.2 照度レベルによる色相変化

照度レベルに対して、色票の見えの色相がどのように変化したかを **Fig. 3** に示す。被験者 HM, AY とともに同じ傾向を示している。图中、照度レベルによってはデ

ータのないところがあるが、これは照度レベルが低いときに有彩色成分をゼロと評価した場合である。

刺激サイズが 2° と 10° 視野のときは、R, Y, Bの色票では、照度レベルが変化しても色相はほとんど一定であり、Gの色票の場合のみ低照度で色相が青色の方向にシフトした。しかし、30' 視野になると、Bの色票の



**Fig. 3** Relation between apparent hue and log illuminance. Test color chips are indicated right side of the figure. (a) for subject HM, (b) for subject AY.

色相が 10 lx 以下で緑色の方向に少しシフトしており、6' 視野になると G と B の色票の色相の差が非常に小さくなること示された。

その要因を検討するために、照度レベルによって色相が変化したテスト刺激の色票 G および B の分光反射率特性を Fig. 4 に示す。照度レベルが高いときに、その色

票の色相が色票 G の場合には緑色、色票 B の場合には青色に見えたとしても、その色票 G と B の分光反射率特性については、それぞれ重複した成分を含んでいる。したがって、照度レベルが変化して低照度になると桿体の作用が大きくなり、眼の分光感度が短波長側にシフトし、大きい刺激サイズの場合には、照度レベルが高いときに

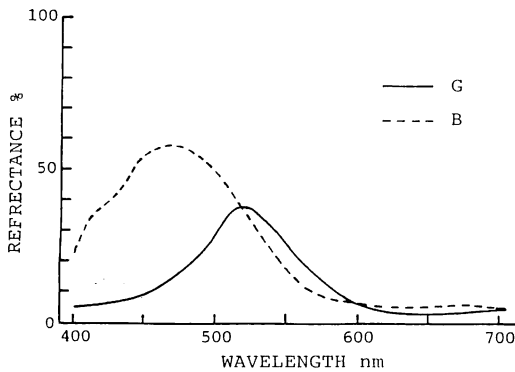


Fig. 4 The spectral reflectance curves of test color chips, G and B.

緑色と評価された色票Gも低照度になると短波長側の反射特性のほうを明るく感じるようになり、それと同時に色視野が広いとされている青錐体の作用<sup>11)</sup>によって、青成分を含んだ色の見えに変化してきたものと思われる。

しかし、刺激サイズが小さくなると、照度レベルが低下しても桿体の作用を受けることなく、錐体の中心小窩の応答のみによって色の見えが変化する。そして、照度レベルが低下するに伴ってその錐体の応答も低下し、Fig. 2 に示すように刺激サイズが6' 視野では、刺激の視野サイズの大きい色票と比較して、有彩色成分も非常に小さくなり、刺激の認識も0.3lx までしかできなくなる。そして、そのサイズが30' 視野では、被験者 HM, AY とともに低照度における色票Gの色相は青色の方向にシフトし、色票Bの色相は緑色の方向にシフトしてその色相差が小さくなっていく。さらに、刺激の視野サイズが6' 視野では、被験者 HM の場合には、色票Bの色相が緑色の方向にシフトし、被験者 AY の場合には、色票Gの色相がやや青色の方向にシフトし、色票Bの色相が緑色の方向にシフトして、色票GとBの色相差が非常に小さくなり、視野サイズの大きい色票とはやや異なった結果が示された。

そこで、このことを確認するために、色票R, Y, G, Bの4種類の刺激を背景N6のマスクを使用して、それぞれ2色ずつ組み合わせて同時に呈示し色の見えを比較した。そのとき刺激の大きさは1刺激6' 視野のサイズで2種類の刺激を視角20'の間隔をおいて呈示した。その結果、照度が10lx 以下になると色相の差は、色票GとBを組み合わせて比較したときのみ、Fig. 3で示された結果のように非常に小さくなることが認められた。このことから、低照度では刺激の視野サイズが小さくなると有彩色成分の低下とともに緑色と青色の区別

がつきにくくなることがあきらかとなった。

### 3.3 照度レベルによる明度の変化

Fig. 5 に照度レベルに対する色票R, Y, G, Bの明度の評価結果を示す。これは、色票を観測したときの明るさを明度の絶対評価で示したものである。図中、低照度するとき、刺激サイズの6', 30' 視野のデータがないところは、照度レベルが低いために、刺激(色票)が認識できなかったためである。

Fig. 5より、Rの色票の場合には、照度レベルに対して明度が大きく変化した。被験者 HM の場合は、10lx 以下では、視野サイズによる差が小さく、10lx 以上になると、2°, 10° 視野では、明度が高くなり、6', 30' 視野では、明度の増加の程度が小さくなっている。これは、低照度においては、明るさの感度が錐体から桿体へ移行するために、Rの色票については黒く見えてくるとの被験者の内観もあり、マンセルバリューよりかなり低く評価されたものと考えられ、高照度になると錐体の応答の増大による見えの色みと白みの増大によって明度が高く評価されたものと思われる。そして、そのとき、視野サイズが6', 30' 視野のものより2°, 10° 視野のものの方が明度が高くなったのは、網膜への刺激面積の差による面積効果によるものと考えられる<sup>3,7)</sup>。

被験者 AY の場合は、照度が高い場合でも刺激サイズによる差が小さく、この被験者の場合は、明るさに対する色みの効果が被験者 HM より小さいと考えられる。

Yの色票の場合、Rの色票の評価結果とほぼ同様な傾向を示しているが、照度レベルが高くなっても、被験者 HM, AY とともにこの色票のマンセルバリュー8.4 とほぼ同じ程度を示している。したがって、この色票については、明度に対する色みの効果が少ないことを意味していると考えられる。

Gの色票の場合、被験者 HM は、約10lx 以上の照度レベルでは、マンセルバリュー5.0より高く評価している。そして、そのとき刺激サイズの大きい2°, 10° 視野の方が、6', 30' 視野より明度が約1高くなっており、刺激の視野サイズの大きいほうが色みの効果によってやや明るく感じている。それに対して、被験者 AY については、高照度で視野サイズによる差がない。しかし、約10lx 以下の低照度になると、視野サイズによる差が顕著に現れ、その視野サイズの小さい色票ほど暗く評価している。

Bの色票の場合、R, Yの色票と比較して照度レベルに対する明度の変化が小さくなった。低照度の場合に

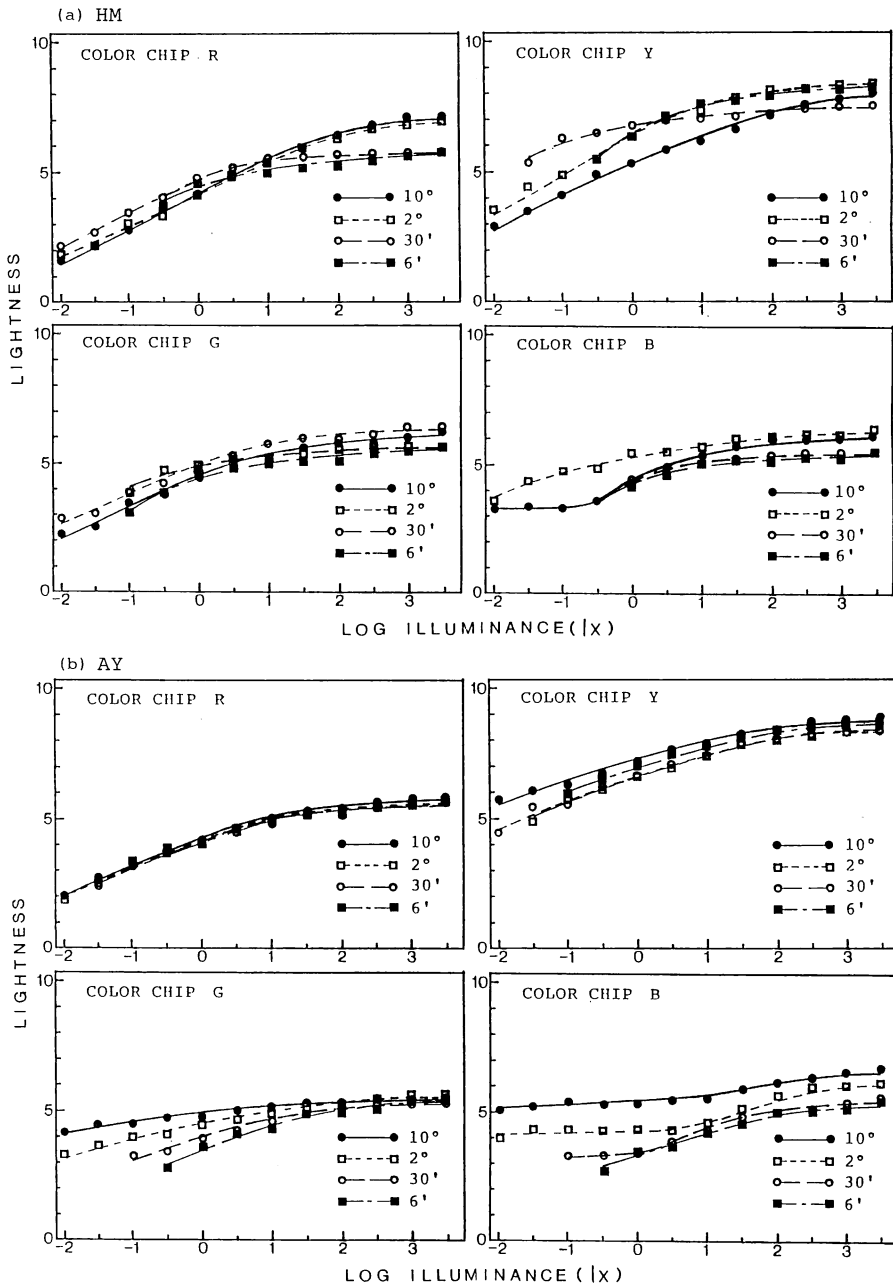


Fig. 5 Relation between apparent lightness and log illuminance. Each symbol represents the experimental results for the 6' (■), 30' (○), 2° (□) and 10° (●) fields. (a) for subject HM, (b) for subject AY.

は、被験者 HM, AY とともに刺激サイズの小さい 6', 30' 視野では、刺激の認識が不可能になり、刺激サイズが 2°, 10° 視野の場合には、明度の低下がほとんどなくなって桿体の作用がはっきりと示された。そして、照度レベルが高くなるにつれて、2°, 10° 視野の場合に色みの

効果によって色票のマンセルバリュー 5.1 より高く評価された。

このように、照度レベルに対する明度については、桿体と錐体の作用、およびその相互作用によって、R, Y の色票については、照度レベルに対する変化が大きく、

Bの色票については変化が小さかった。そして、照度レベルが高くなると、色みの効果が明るさの評価に寄与し、Yの色票を除く色票については色票のマンセルバリューより高く評価された。これは、Helmholtze-Kohlrausch効果<sup>12,13)</sup>で視覚の色チャンネルが明るさの評価に寄与し、寄与の小さい黄系の色を除いて、色票のマンセルバリューより高く評価されたと解釈できる。そして、刺激サイズによっても明度に対する効果の大きいことがわかった。

#### 4. おわりに

本研究では、照度レベルと刺激サイズの大きさを変えたときの表面色の色の見えが、どのように変化するかをあきらかにすることを目的として実験を行った。

その結果、照度レベルに対する有彩色成分の割合は、どの色票の場合でも、照度レベルが高くなるにつれて大きく増加し、100 lx 以上になるとその増加の程度が非常に小さくなることがわかった。また、刺激サイズによる有彩色成分の割合の差は、低照度レベルで非常に大きくなり、刺激サイズの小さい色票ほどその成分が少なくなるということがあきらかとなった。そして、照度レベルが高くなると、刺激サイズが 30', 2°, 10° 視野の有彩色成分の割合の差は小さくなり、6' 視野では、色票Yの有彩色成分が減少して小視野トリタノピアの現象が見られた。

照度レベルに対する色相の変化について、刺激サイズが 2°, 10° 視野では、R, Y, Bの色票の色相はほぼ一定であったが、Gの色票については、照度レベルが低くなると青色の方向にシフトした。しかし、刺激サイズが 6' 視野のとき、照度レベルが低くなると有彩色成分が非常に少なくなり、GとBの色票の色相の区別がつきにくくなることが示された。

照度レベルに対する明るさの評価については、R, Yの色票の明度の変化が大きく、Bの色票については変化

が小さかった。そして、照度レベルが高くなるとYを除く色票については、Helmholtze-Kohlrausch 効果によって、視覚の色チャンネルが明るさの評価に寄与し、マンセルバリューより高く評価された。

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) 湯尻 照: “色票の色の見えの輝度レベルによる変化”, 光学, **18** (1989) 208-214.
- 2) W. E. K. Middleton and M. C. Holmes: “The apparent colors of surfaces of small subtense—A preliminary report,” J. Opt. Soc. Am., **39** (1949) 582-592.
- 3) B. H. Marshall and J. P. Guilford: “The dependence of hue, tint and chroma upon area,” Am. J. Psychol., **46** (1934) 465-469.
- 4) S. S. Stevens: “The relation of saturation to the size of the retinal image,” Am. J. Psychol., **44** (1933) 70-79.
- 5) R. E. Bedford and G. W. Wyszecki: “Wavelength discrimination for point sources,” J. Opt. Soc. Am., **48** (1958) 129-135.
- 6) C. R. Ingling, H. M. O. Scheibner and R. M. Boynton: “Color naming of small foveal fields,” Vision Res., **10** (1970) 501-511.
- 7) R. W. Burnham: “The dependence of color upon area,” Am. J. Psychol., **64** (1951) 521-533.
- 8) R. M. Boynton, W. Schafer and M. E. Neun: “Hue-wavelength relation measured by colour-naming method for retinal locations,” Science, **146** (1964) 666-668.
- 9) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 東京, 1980) pp. 169-179.
- 10) Svensk Standard, SS 01-91-02 (1984).
- 11) 関口修利, 池田光男: “色の見えに基づく色視野の測定”, 日本眼光学学会誌, **4** (1983) 122-127.
- 12) C. R. Ingling and B. H. Tsou: “Orthogonal combination of the three visual channels,” Vision Res., **17** (1977) 1075-1082.
- 13) H. Yaguchi and M. Ikeda: “Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching,” Vision Res., **23** (1983) 1711-1718.