



両眼隔壁等色法による薄明視における表面色の見えの測定

門馬 智春・本間園乃枝・矢口 博久・塩入 諭・羽石 秀昭・三宅 洋一

千葉大学工学部情報工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1992年11月16日受付, 1993年2月4日受理)

Haploscopic Color Matching for Surface Color in Mesopic Vision

Chiharu MOMMA, Sonoe HONMA, Hirohisa YAGUCHI, Satoshi SHIOIRI,
Hideaki HANEISHI and Yoichi MIYAKE

Department of Information and Computer Sciences,
Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

(Received November 16, 1992; Accepted February 4, 1993)

Color vision at an intermediate luminance or illuminance level between photopic and scotopic range is called mesopic vision. In mesopic vision, we perceive different colors from in photopic vision, because not only cones but also rods contribute to the visual response. In this paper, color appearance for 36 color chips under 6 illuminance levels from 0.01 lx to 1000 lx was estimated by a haploscopic color matching method. A test color chip was presented in the test field and observed by the left eye, and the Natural Color System (NCS) Color Atlas in the reference field was observed by the right eye. One color chip which has the same color appearance as the test color was selected from the NCS Color Atlas. Subjects responded four scales of the NCS, hue, whiteness, blackness and chromaticness. The experimental results show that as the illuminance decreased, (1) chromaticness decreased, (2) hue shift was observed in green-blue and yellow-orange regions and (3) brightness contrast decreased.

1. はじめに

人間の視覚系は明所視レベルから暗所視レベルまで幅広い照度レベルに対して順応し、物を認識することができる。この調節機能は網膜の2種の光受容細胞である錐体と桿体が入れ替わることによってなされている。すなわち明所視ではおもに錐体が、暗所視では桿体が機能するという役割分担がなされているために、人間の視覚系は幅広い照度範囲に適應することができる。明所視から暗所視へと移行していく遷移過程である薄明視では、この錐体と桿体の双方が機能するため、明るさおよび色の知覚のメカニズムが複雑になる。

明るさに関しては、照度の低下に伴い分光感度のピークが短波長側へと移行することが知られている¹⁻⁴⁾。このように長波長域の赤が薄明視領域では短波長域の青に比べて暗く知覚される現象はプルキンエ現象と呼ばれて

おり、物体色についても観測され、定量的な解析も行われている^{5,6)}。さらに、全照度域において人間の知覚に即した明るさを測る測光システムの開発の試みもなされており⁷⁻¹¹⁾、薄明視における明るさに関する研究は活発に行われている。しかし、薄明視レベルにおける色の見えに関しては、物体色の見えについてのカラーネーミング法による測定¹²⁻¹⁴⁾の他、報告例が少ない。薄明視領域での錐体と桿体の機能分担についても明らかになっていないため、任意の色についてその薄明視下での色の見えを予測することは難しい。

そこで本研究では照度レベルの低下に伴い知覚される色がどのように変化するかを調べるために、両眼隔壁等色法により色票の見えを定量的に測定する実験を行った。

2. 実 験

薄明視照度を含むさまざまな照度レベル下でのテスト色票の見えを、両眼隔壁等色法により測定した。この方法は中央に隔壁を設けた観測ブースの左右をそれぞれ異なる照度で照明し、被験者の眼を十分に順応させた後に、左右の視野に置かれた色票の見えが同じになるようにマッチングを行うものである。両眼隔壁等色法は一方の眼の観察条件による順応が他方の眼に影響しない¹⁵⁾という前提の下に行われる。また、隔壁部分には黒布の光吸収材が張っており、片側の色票を見ているときにはもう片方の眼はこの黒い隔壁部分を見ることになる。つまり、同時に左右の視野を見るのではなく、交互に基準視野とテスト視野を見るので、左右で照度が大きく異なる場合でも反対の視野の影響は少なくなると考えられる。今回の実験ではブースの左側をテスト視野、右側を基準視野とし、テスト視野に置かれたテスト色票の対応色を基準視野に置かれた色票集の中から選択した。

観測ブースの左右のボックスの上方にそれぞれ 15 本ずつ D65 近似の蛍光灯ランプ (FL 20 S・D-EDL-D65) をとりつけた。この装置では、蛍光灯の点灯本数・分光透過率の波長非選択性の黒布フィルターの枚数・蛍光灯表面にとりつけた遮光筒の幅を調節することにより、相対分光分布を変えずに照度を任意に変化させることができる。色票観察面に背景としてグレイの A2 サイズの色票 (マンセルバリュー N5.0) を置き、ブースの内側はグレイの紙 (マンセルバリュー N5.0 相当) で覆った。

基準視野の照度を 1000 lx、テスト視野の照度を 1000, 100, 10, 1, 0.1, 0.01 lx の 6 レベルに設定した。テスト色票は有彩色 30 枚、無彩色 6 枚の合計 36 枚を使用し、基準色票集として NCS (natural color system) 色票¹⁶⁾を使用した。Table 1 にテスト色票の NCS 記号 (Appendix 1 参照) と実験で使用した D65 近似の蛍光灯照明での CIE 1931 x, y 色度座標, Y 三刺激値および CIE 暗所視分光視感効率関数 $V'(\lambda)$ による輝度率 Y' を示す。測定には分光放射輝度計 SR1 を使用した。

Fig. 1 にテスト色票の xy 色度座標を示す。色票観測時には背景と同じグレイ色票でできた観測マスクを用い、観測マスクの開口から色を観察するようにした。この開口は観察距離 40 cm のときに視野サイズがテスト視野で 10° 、基準視野で 2° になるように設定した。テスト視野と基準視野で視野サイズが異なる理由は、テスト視野では照度レベルの低下による桿体の介入による色の見えの変化を測定できるようにするために桿体が十分に

Table 1 The NCS notations, CIE 1931 x, y chromaticity coordinates, and photopic and scotopic luminance factors of the test color samples.

Color chip	NCS notation	x	y	Y	Y'
1	3235-R 35 B	0.314	0.231	12.67	13.71
2	2663-R 29 B	0.445	0.266	12.68	7.63
3	1974-R 02 B	0.559	0.321	13.78	5.31
4	0868-Y 43 R	0.511	0.408	45.59	19.63
5	0973-Y 02 R	0.469	0.478	62.54	28.76
6	0974-G 45 Y	0.394	0.514	45.97	29.32
7	4354-G 02 Y	0.264	0.431	12.60	15.33
8	3952-B 67 G	0.229	0.351	12.38	19.48
9	3656-B 16 G	0.205	0.271	12.31	23.48
10	3059-R 88 B	0.209	0.213	12.21	23.94
11	2240-R 53 B	0.321	0.276	30.72	34.58
12	2043-R 28 B	0.395	0.304	31.55	26.49
13	1749-R	0.450	0.341	31.64	19.87
14	2550-Y 51 R	0.479	0.392	30.74	15.97
15	3057-G 97 Y	0.452	0.459	31.55	16.86
16	2363-G 44 Y	0.386	0.492	31.20	20.67
17	1956-G	0.273	0.421	30.30	34.91
18	2054-B 68 G	0.238	0.356	29.18	41.69
19	1556-B 22 G	0.222	0.298	30.78	50.06
20	1945-R 88 B	0.254	0.267	30.32	45.14
21	3322-R 56 B	0.324	0.303	30.24	32.66
22	3421-R 28 B	0.364	0.323	30.30	27.68
23	3323-R 03 B	0.389	0.341	30.56	24.65
24	3820-Y 50 R	0.409	0.371	30.43	22.11
25	4024-G 98 Y	0.401	0.408	30.24	21.80
26	3629-G 50 Y	0.365	0.415	30.85	24.97
27	3131-G 01 Y	0.304	0.385	30.43	31.53
28	3031-B 71 G	0.282	0.354	30.48	35.69
29	2831-B 21 G	0.275	0.321	31.09	38.92
30	3123-R 86 B	0.293	0.304	31.22	37.61
31	300	0.336	0.343	93.80	92.44
32	2600	0.333	0.340	51.97	51.85
33	4500	0.331	0.338	30.94	30.98
34	6500	0.331	0.337	16.46	16.45
35	8300	0.330	0.337	7.24	7.27
36	9400	0.323	0.329	2.37	2.45

分布する視野サイズとして 10° とし、基準視野は常に 1000 lx と一定の照度レベルで錐体だけによる色の見えを観察できるように 2° 視野とした。

被験者は 15 分間暗順応した後、色票観測照度に 5 分間順応してからマッチングを開始した。観測用マスクを置いてその中心に見える色が左右で等しくなったら、マッチングを終了する。同じ見えの色票が色票集の中になければ、自由に内挿または外挿して NCS 表色系の四

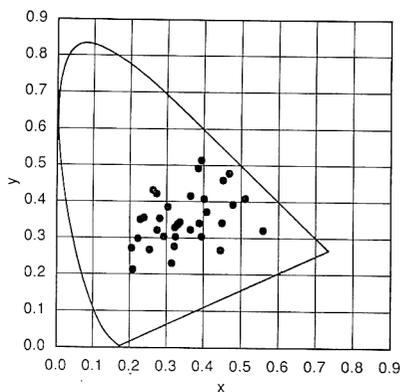


Fig. 1 CIE 1931 (x, y) chromaticity diagram showing 36 test color chips.

つのパラメータ、色相(ϕ)・色み(c)・黒み(s)・白み(w)でその色を応答してもらった。テスト色票はランダムに呈示した。被験者は色覚正常者 10 名で、各被験者とも同一照度において 2 回ずつマッチングを行い、その平均値を各被験者の応答値とした。また内挿、外挿時にも正確な応答値が読み取れるように実験前に NCS 表色系については十分に説明を行った。

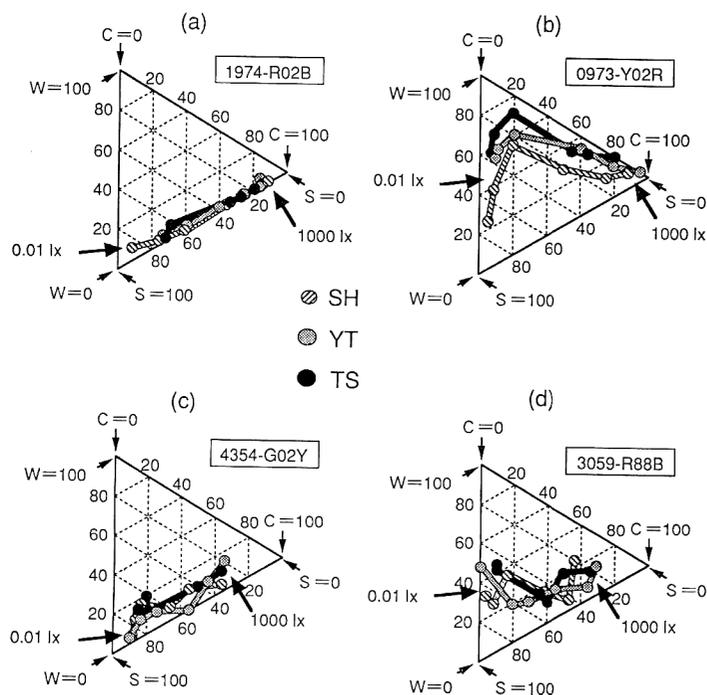


Fig. 2 Changes of color appearance of (a) red, (b) yellow, (c) green and (d) blue color chips in the NCS triangle. Different symbols show the data from three subjects.

3. 結果および考察

3.1 有彩色色票の白み・黒み・色み知覚の変化

Fig. 2 はテスト色票のうち、代表的な 4 枚の色票；(a) 色みの強い赤 (NCS 記号で 1974-R 02 B), (b) 黄 (0973-Y 02 R), (c) 緑 (4354-G 02 Y), (d) 青 (3059-R 88 B) の色票について、1000 lx から 0.01 lx までの 6 レベルの照度に対して応答した色み(c)・黒み(s)・白み(w)を NCS の等色相面である三角座標に表したものである。どの色票についても、右端の測定点が 1000 lx の応答の座標を表し、順に照度が低下するほど左方向に移行し、最低照度レベル 0.01 lx では $c=0$ の軸に近づく。つまり、どの色票でも、照度が低下するにつれて知覚される色みは減少し、0.01 lx のときにはほとんど色みは知覚されていないことがわかる。この傾向は色相によらず 30 枚の有彩色の色票に共通してみられた。Fig. 2 は 3 人の被験者の結果であるが、10 人の被験者の全体的な傾向を調べるために、30 枚の有彩色の色票についてすべての被験者の応答より平均値を求め、照度に対する c, s, w 応答値の変化を調べた。Fig. 3 はその結果であり、(a) は色みの多い色票、(b) は中程度、(c) は色みの少ないグループにまとめてある。これより、照度が低下するとともに(1)色みの知覚量は減少する、(2)黒みの知覚は増加する、(3)白みの知覚は色相により異なる傾向があることがわかった。照度レベルが低下につれて、赤・赤紫・紫の色相に関しては知覚される白みはほとんど変化しないのに対して、オレンジ・黄・黄緑の色相に関しては 1 lx まで増加した後減少する方向に変化し、また、青・青緑・緑の色相では白み知覚量は増加した。

ここで、このような低照度における白み知覚の色相依存性の原因を考えてみる。Fig. 4 は本実験における最低照度の 0.01 lx における白み知覚量 w と暗所視輝度率 Y' の関係を 36 枚の色票について示したものである。色相にかかわらず、白み知覚量は暗所視輝度率に対して単調増加していることがわかる。生理学あるいは心理学の実験より物体色の反射率と明度の関係は非線形であると言われてい

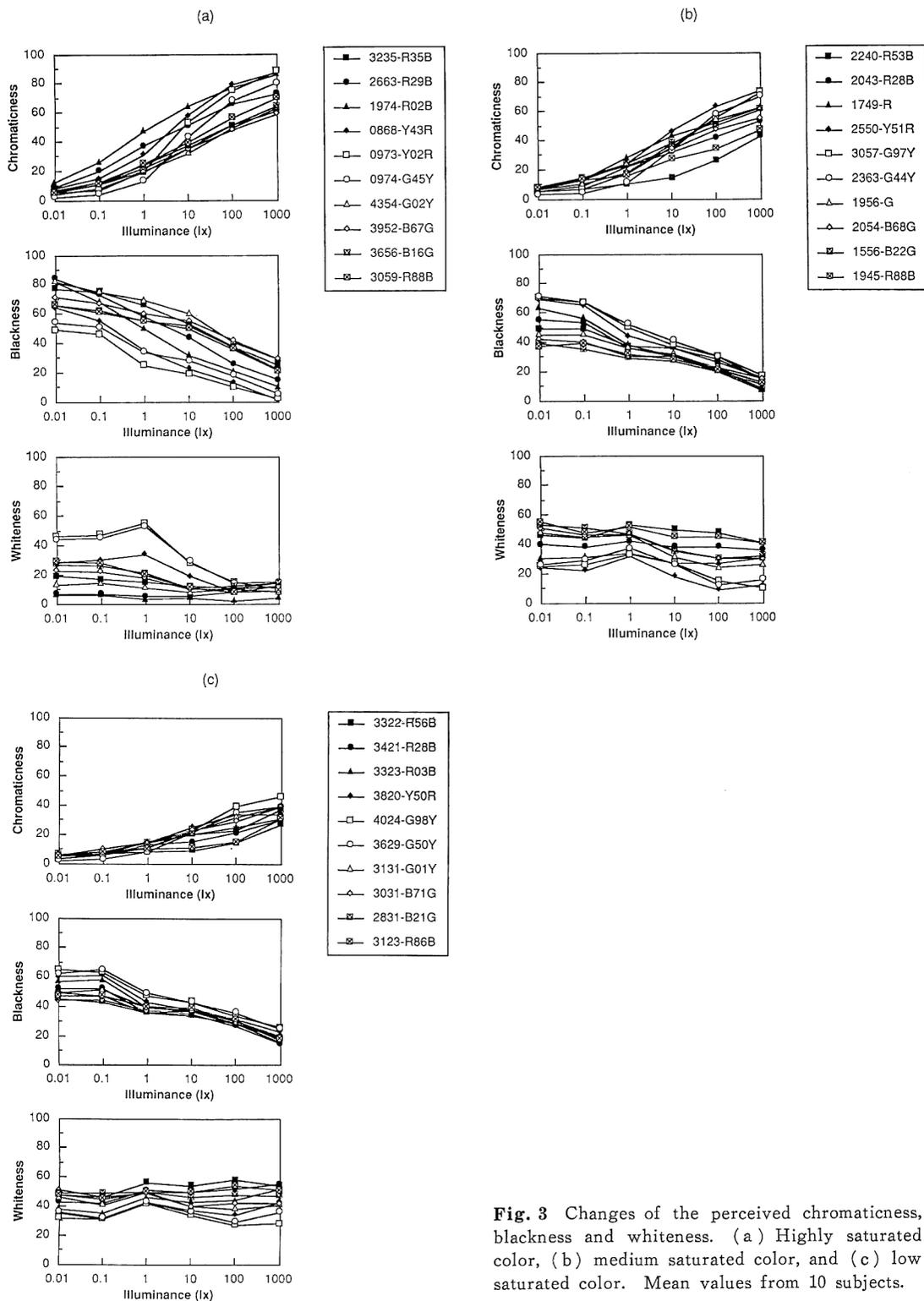


Fig. 3 Changes of the perceived chromaticness, blackness and whiteness. (a) Highly saturated color, (b) medium saturated color, and (c) low saturated color. Mean values from 10 subjects.

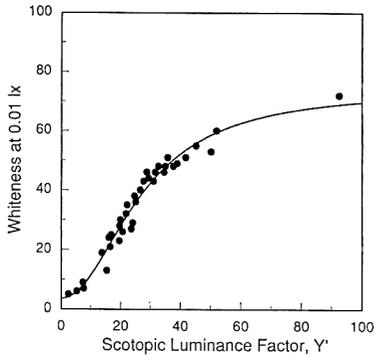


Fig. 4 Whiteness of all test samples at 0.01 lx as a function of scotopic luminance factor.

る¹⁷⁾. ここでは, Fig. 4 の結果を光刺激強度と視細胞の応答の関係を生理学実験から求めた変換式¹⁸⁾を修正した次式で表せる関係式により近似した.

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \frac{Y'^n}{Y'^n - \sigma^n} \quad (1)$$

ここで, w_{\min} , w_{\max} はそれぞれ白み知覚量の最小値, 最大値であり, σ は白み知覚量が $(w_{\max} - w_{\min})/2$ になる Y' の値である. (1)式を Fig. 4 のデータに適用し, 非線形最小 2 乗法により係数を求めた結果, 次式が得られた.

$$w = 3.5 + (74.1 - 3.5) \frac{Y'^{2.07}}{Y'^{2.07} - 27.22^{2.07}} \quad (2)$$

このようにして得られた関係式は実験データとよく一致しており, 相関係数は $r^2 = 0.966$ であった. 以上の解析により, 低照度における白みは桿体によるものであることが明らかになり, 照度低下に伴う色相による白み知覚の変化は, 桿体の寄与により色票の明るさ知覚が変化

し, 短波長域にエネルギー分布をもつ青・緑系の色票の白みの知覚量を増大させた結果であると考えられることができる.

また, 白みのグラフが 10 lx ないしは 1 lx のところで傾きに変化がみられることより, 桿体の介入が始まる照度はほぼ 1~10 lx 付近であると考えられる. これは池田⁵⁾, 湯尻⁶⁾らの実験結果とも一致している.

3.2 有彩色色票の色相知覚の変化

Fig. 5 に有彩色テスト色票 30 枚について被験者 TF が応答した色相 (ϕ) と色み (c) を NCS 表色系の色相環上にプロットした結果を示す. (a), (b), (c) は Fig. 3 と同じく, 色みの強さにより三つのグループにまとめてある. どの色票についても高照度のときは応答値は色相環の外周寄りに位置していたのが, 照度が低下するにつれて中心の無彩色軸方向にプロット点が移動した. このとき, 照度の低下とともに被験者が同一の色相を知覚しているならば中心軸方向へと向かう軌跡は直線になるはずであるが, 実際には青から緑 (NCS 記号で B から G) と黄からオレンジ (Y から Y 50 R) の領域にかけて照度低下とともに軌跡は右周りの方向へカーブしているのがわかる. これより, 照度変化にともない色相知覚の規則的なシフトがあることがわかる. このシフトの傾向は他の 9 人の被験者についてもみられた. そこで, 30 枚の有彩色色票すべてについて, その 10 人の被験者が応答した色相の平均値を照度に対してプロットを行った結果を **Fig. 6** に示す. 30 枚を前述のように 3 グループにわけて表示した. これより, 10 lx 以下の比較的低照度レベルについては, 色みの強さに関係なく, 照度が低下するとともに青から緑 (B から G) の色相が青

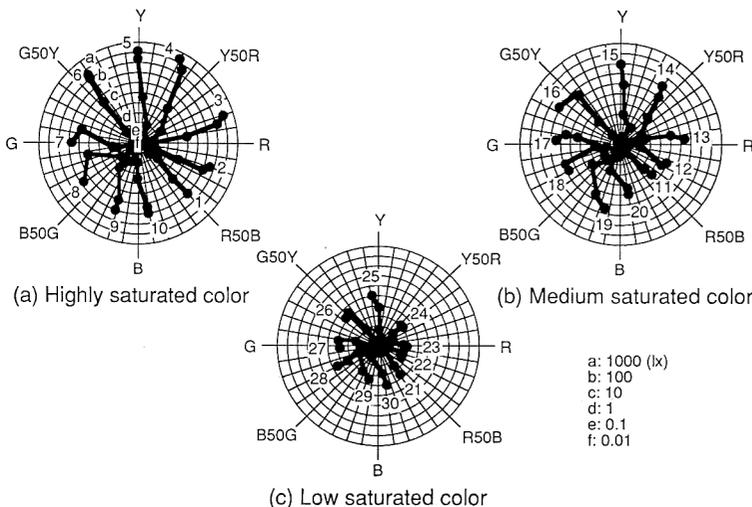


Fig. 5 Changes of the perceived hue of 30 color chips in the NCS color circles. (a) Highly saturated color, (b) medium saturated color, and (c) low saturated color. Data from subject TF.

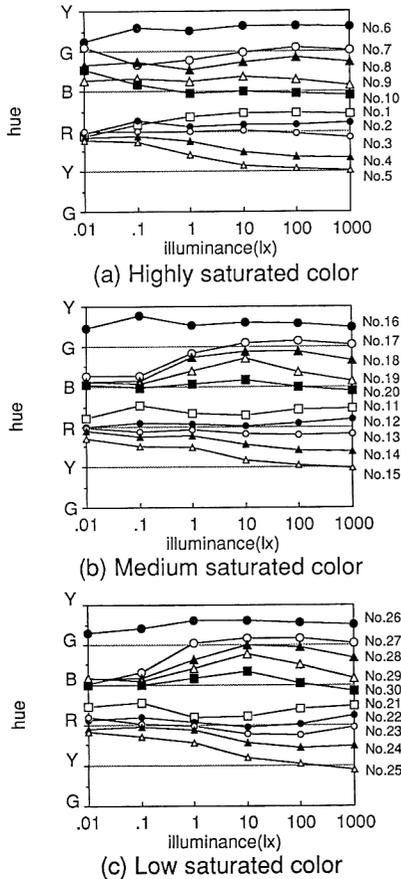


Fig. 6 The perceived hue of 30 color chips as a function of illuminance. (a) Highly saturated color, (b) medium saturated color, and (c) low saturated color. Mean values from 10 subjects.

方向へ、黄からオレンジ (Y から Y 50 R) の領域にかけての色相が赤方向へ移行していくのがみられた。

0.01 lx や 0.1 lx の低照度レベルでは、青系・緑系の色票に対してほとんど色みが知覚されていないことと、被験者の応答値には個人差が大きくみられることより、青方向へ色相知覚のシフトは 507 nm 付近に感度ピークをもつ桿体の応答が短波長感錐体 (S 錐体) および中波長感錐体 (M 錐体) の応答になんらかの関与を示した結果ではないかと考えられる。また、1000 lx のときに同程度の色みの強さであった黄と赤の色票が、0.01 lx や 0.1 lx の低照度レベルでは赤の色相として知覚されている。黄系・赤系の色票については低照度でも他の色相のものに比べると色みの知覚は強いいため、赤方向へのシフトは長波長感錐体 (L 錐体) によってなされていると考えることができる。この結果は桿体と錐体の感

度差による光・色覚間隔が長波長域において狭くなること、つまり絶対閾値のレベルでも L 錐体と桿体の感度がほぼ等しいこと¹⁹⁾からも示唆される。

明所視と考えられる 10 lx 以上の照度に対しては、10 lx のときにオレンジに知覚されていた色相が、1000 lx のときには黄として知覚され、また 10 lx の緑が青に知覚されるような色相の移行がみられた。この傾向は Bezold-Brücke 色相移行²⁰⁾と良く似た現象であるといえる。Bezold-Brücke 色相移行は単色光などの光源色を用いた実験で知られる現象であるが、物体色についても Bezold-Brücke 色相移行が生じているが判明した。

3.3 無彩色色票の白み知覚の変化

Fig. 7 にそれぞれ明度の異なる無彩色の色票 6 枚について、10 人の被験者が応答した白み (w) の平均値を照度に対してプロットした結果を示す。最も白い色票 (NCS 記号で 0200) と最も黒い色票 (NCS 記号で 9400) では、照度 1000 lx のとき知覚された白みの差が 95 であったのに対して、照度 0.01 lx では差は 69 となり小さくなっていることがわかる。1 lx のときのみは例外であるが、照度低下とともに知覚される白みのコントラストが低下するといえる。この現象は、NCS 表色系における無彩色の白みが明るさとほぼ比例関係にあること (Appendix 2 参照) から、明るさコントラストの低下と考えることができる。つまり、照度が高くなるほど白は明るく感じ、黒は暗く感じるという Stevens 効果²¹⁾と同様の効果であると考えられる。Fig. 7 より Stevens 効果は薄明視領域でもかなり低照度まで観察されるといえる。

3.4 個人差

ここまで実験結果を主に 10 人の被験者の平均値で述べてきたが、次に色の見えに対する応答の個人差について述べる。Fig. 2 は照度低下に伴う白み、黒み、色みの

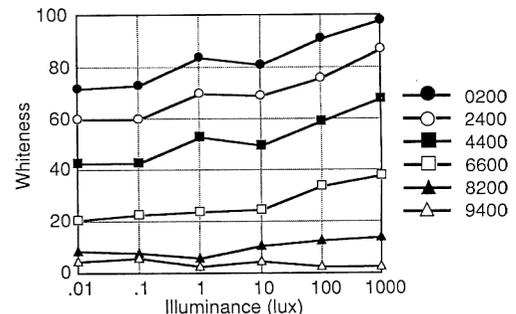


Fig. 7 Whiteness of 6 achromatic color samples as a function of illuminance. Mean values from 10 subjects.

変化の3人の被験者からの結果であるが、他の被験者についてもほぼ同様の軌跡を描いて、色みの減少がみられた。しかし、被験者によりある色みまで減少する照度レベルは異なっていた。換言すれば、同じ照度レベルでも被験者により色みの応答が異なっていることになる。

Fig. 8 に 1lx の照度における色みの応答が非常に異なる2人の被験者の結果を示す。被験者 CM (●) は色みを弱く感じ、TS (○) は色みを強く感じるタイプであることがわかる。この個人差の原因として、そもそも個人により色みを感じる強さに差があることが考えられる。色みを感じる強さの個人差については直接比較法による明るさの判断においても報告されている²²⁾。また別の原因として、観測ブースの照度が同じであっても、この実験では人工瞳孔を用いていないため、被験者により瞳孔径が異なるため網膜照度が異なっていた可能性もある。

次に、色相の知覚の個人差を10人の被験者からの色相応答値の標準偏差により調べた。Fig. 9 は色みの強い10枚の色票 (No. 1~10) についての色相応答値の標準偏差を、照度 1000, 10, 0.1, 0.01 lx の4レベルについて示したものである。縦軸の色相の単位は色相環全体で400に相当する単位である。1000および10 lx では標準偏差は小さく、個人差があまりみられないが、0.1および0.01 lx の低照度では個人差が大きいことがわかる。この原因として、低照度では知覚される色みが少ないため、色相の判断が困難になったことが考えられる。同様の傾向が他の色票 (No. 11~30) についてもみられた。また、色相によって個人差の大きさも異なり、特に低照度では黄緑と緑の領域で個人差が大きく、赤の色票

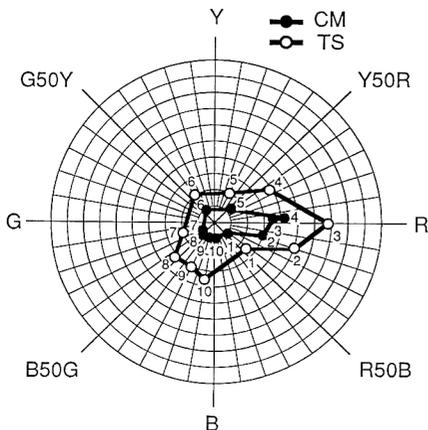


Fig. 8 Individual difference of the perceived chromaticness of 10 color chips at 1lx between two subjects CM and TS.

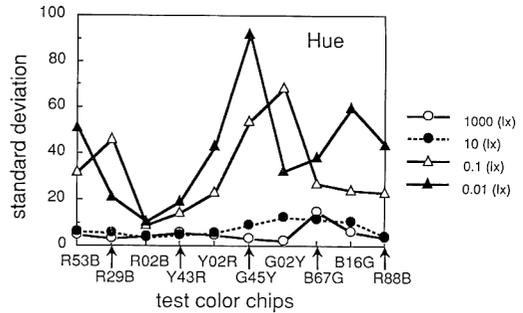


Fig. 9 Standard deviation of the perceived hue from 10 subjects.

については照度に関係なく個人差が少ないことがわかった。

4. ま と め

照度レベルによる色の見えの変化を両眼隔壁等色法により測定した結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 照度が低下すると、有彩色色票について知覚される色み成分は減少する。
- (2) 照度が低下すると、黒み知覚量は増加する。
- (3) 照度が低下したとき知覚される白みの変化は色票の分光分布によって異なる。長波長成分を多く含むものは白みが減少し、短波長成分を多く含むものは白みが増加する。
- (4) 照度の変化に伴い、明所視領域では Bezold-Brücke 色相移行が起こり、薄明視領域では照度低下に伴い、青-緑の色相が青方向へ、黄-オレンジの色相が赤方向へ移行する。
- (5) 照度が低下すると、知覚される明るさコントラストが低下する。
- (6) 照度変化に対する白み、黒み、色みの応答値の変化の軌跡には個人差はみられないが、同一照度での色みの知覚量の個人差がみられた。
- (7) 知覚される色相の個人差は照度が低下すると大きくなる。また、黄緑、緑の色相の見えの個人差が大きい。

本研究により、明所視における色の見えと薄明視における色の見えの対応関係が得られたことになる。この結果を利用して、明所視での測色値から薄明視の色の見えを予測することが可能になった。したがって、この研究成果は薄明視における視環境のシミュレーションや薄明視画像の色再現システムの設計に役立つと考えられる。

本研究は文部省科学研究費 (課題番号 04650034) の補助により行われた。

文 献

- 1) J. A. S. Kinney: "Sensitivity of the eye to spectral radiation at scotopic and mesopic intensity levels," *J. Opt. Soc. Am.*, **45** (1955) 507-514.
- 2) M. Ikeda and H. Shimozono: "Mesopic luminous efficiency functions," *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 280-284.
- 3) H. Yaguchi and M. Ikeda: "Mesopic luminous efficiency functions for various adapting levels," *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1984) 120-123.
- 4) K. Sagawa and K. Takeichi: "Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 71-75.
- 5) M. Ikeda, C. C. Haung and S. Ashizawa: "Equivalent lightness of colored objects at illuminances from the scotopic to the photopic level," *Color Res. Appl.*, **14** (1989) 198-206.
- 6) 湯尻 照: "照度レベルによる表面色の明るさの変化: 色相, 明度, 彩度の影響," *照明学会誌*, **74** (1990) 668-673.
- 7) D. A. Palmer: "Standard observer for large-field photometry at any level," *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 1296-1299.
- 8) S. Kokoschka: "Photometry of low luminances based on the equivalent luminance for a 10-degree field," *Licht-Forschung*, **2** (1980) 1-13.
- 9) K. Sagawa and K. Takeichi: "System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1240-1246.
- 10) P. W. Trezona: "A system of mesopic photometry," *Color Res. Appl.*, **16** (1991) 202-216.
- 11) N. Nakano: "New model for brightness perception," *Advances in Color Vision Tech. Digest*, 1992, Vol. 4, pp. 99-101.
- 12) 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.
- 13) 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** (1990) 97-104.
- 14) H. Yaguchi, C. Momma, K. Tokunaga and Y. Miyake: "Color appearance in mesopic vision," *Color Vision Deficiencies*, eds. Y. Ohta (Kugler & Ghedini Publ., Amsterdam, 1990) pp. 21-28.
- 15) R. W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television*, 4th ed. (Fountain Press Tolworth, 1987) pp. 124-127.
- 16) *NCS Color Atlas*, Svensk Stansard SS 019102, SIS, Stockholm.
- 17) 重松征史: "生理学関数による明度変換関数の近似," *電子情報通信学会論文誌A*, **110** (1990) 267-274.
- 18) K. Naka and W. A. Rushton: "S-potential from colour units in the retina of fish (Cyprinidae)," *J. Physiol.*, **185** (1966) 536.
- 19) G. Wald: "Human vision and the spectrum," *Science*, **101** (1945) 653-658.

- 20) R. M. Boynton and J. Gordon: "Bezold-Brücke hue shift measured by color-naming technique," *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 78-86.
- 21) S. S. Stevens: "To honor Fechner and repeal his law," *Science*, **133** (1961) 80-86.
- 22) H. Yaguchi, A. Kawada, S. Shioiri and Y. Miyake: "Individual differences of chromatic channels to brightness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993), in press.

Appendix 1. NCS 表色系について

NCS 表色系は, Hering の反対色に基づき, 六つの基本色, 赤, 黄, 緑, 青, 黒, 白の組み合わせで色を表す. 基本色以外の色は基本色に対する類似度の和で表され, これを基本属性と呼ぶ. これは w, s, y, r, b, g と小文字で表され, それぞれ 0~100 の範囲の数字である. 任意の色は, $w+s+y+r+b+g=100$ で表される. ただし, $w+s=0$ の場合を純色 C とし, 反対色理論により青と黄, 緑と赤は同時に構成要素とすることはできない. 純色 C の色相は ϕ は次式で表される.

$$\phi_r = 100 \frac{r}{r+y}, \quad \phi_b = 100 \frac{b}{b+r}, \quad \phi_g = 100 \frac{g}{g+b},$$

$$\phi_y = 100 \frac{y}{y+g}$$

また有彩基本属性 (r, y, g, b) の和を色み (c) という. したがって, 各色相における色は, この色みと白み (w), 黒み (s) の 3 成分の百分率で表記され, $c+s+w=100$ の関係が成り立つ. この関係を図示すると, Fig. 2 のような三角座標になる. NCS 表色系の表示方法は黒み, 色みの順に 2 桁の数字を並べ, ハイフン (-) の後に色相を書く. 例えば, 色みが 30%, 白みが 50%, 黒みが 20% 感じられる色で, その色相が赤みが 30%, 黄みが 70% の場合は, 2030-Y30R となる.

Appendix 2. NCS の白み (w) と明るさの関係

NCS 表色系では無彩色色票に限って, 白み (w) と視感反射率 Y の関係が次式で与えられている.

$$Y = \frac{56w}{156-w}$$

この式による w と Y の関係は, Stevens の法則による明るさと輝度との関係, あるいはマンセルバリューと視感反射率の関係に近いものである.