空間照度変化に起因する色の見えのモード遷移

正会員 片山 一郎 (宮城工業高等専門学校) 専門会員 榎見 和孝 (放送大学)
非会員 青木 務 (神戸大学)

Mode Transition between the Surface-Color and Aperture-Color Modes Caused by Changes in the Illuminance of a Space

Member Ichiro Katayama (Miyagi National College of Technology), Fellow Member Kazuyoshi Masumi (The University of the Air)
and Non Member Tsutomu Aoki (Kobe University)

ABSTRACT

Mode transition thresholds between the surface-color and the aperture-color modes of chromatic stimuli were examined. The luminance of the chromatic stimuli on a CRT display was kept constant, and the illuminance of an experimental booth including a subject was varied. The relationship between the mode transition thresholds and brightness-to-luminance (B/L) values of the stimuli was examined in experiment 1, and the relationship between them under a different illuminant was examined in experiment 2. The results of experiment 1 showed that the mode transition thresholds changed with the stimulus chromaticity and correlated highly with the B/L values of the stimuli. Moreover, the values of the mode transition thresholds depended upon not only the stimulus chromaticity but also the experimental method. That is, the values obtained with the constant chromatic stimuli method adopted in the present study were smaller than those with the variable chromatic stimuli method in previous studies. In addition, the results of experiment 2 showed that the mode transition thresholds correlated highly with the B/L values irrespective of the illuminant chromaticity. The results of experiments 1 and 2 lead us to the conclusion that mode transition perception is closely connected with a brightness perception mechanism.

KEYWORD : color appearance, surface-color, aperture-color, mode transition, brightness-to-luminance ratio

1. 緒言

色の見えのモードは、表面色モードと開口色モードに大別でき¹⁾、色刺激の物理的性質とは無関係に、刺激と環境との関係で決まる知覚現象である^{2)~9)}。刺激の物理的組成が一定であっても、見えのモードによって知覚される見えは大きく異なる。例えば、灰色や茶色の知覚は表面色モードにおいてのみ生じる。そのため、異種画像メディア間で見えの一致を実現するには、測色値の一致のみでは不十分であり、見えのモードについて考慮する必要がある。また、同一メディアにおいても、観察環境によってモードの変化が生じる場合がある。

Evans ら¹⁰⁾¹¹⁾は、視角 10° の白色背景中心にもうけた 1° の開口からスペクトル色光および赤紫軌跡上の色光を呈示し、その見えの変化を観察した。概要は次のようである。白色背景輝度を 320cd/m^2 の一定に保ち、中心刺激の輝度を0値から次第に上昇させると黒みが減少し、色みおよび灰色みが増大する。刺激輝度をさらに上昇させると、灰色みが無くなり、色みのみが知覚される点に達する。その点を zero grayness point つまり G_0 点と定め、式(1)で定義した。

$$G_0 = \log(L_0/L_t) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 L_0 は背景輝度、 L_t は中心刺激輝度である。

G_0 点に至るまでは、中心刺激は物体色としての見えを呈し、 G_0 点を越えて輝度を上昇させると、刺激は蛍光を発しているような見えを呈するようになる。Evans はこのときの見えを fluorence と呼び、物理的な蛍光と区別した。さらに刺激輝度を上昇させると、刺激の見えは開口色となる。fluorence 知覚は、灰色み知覚と排他的な関係にあり、同時に知覚されることはない。以上の観察結果から、 G_0 点近傍に見えのモード遷移点が存在すると考えられる。 G_0 値は刺激波長の chromatic strength で決定され、その波長特性は、Helmholtz-Kohlrausch 効果のそれと基本的に一致する¹²⁾。つまり、色刺激の見えのモード遷移点の波長特性は、Helmholtz-Kohlrausch 効果の波長特性と一致することになる。鯉田ら¹³⁾は、呈示色刺激の純度を変化させ、見えのモードを得点法により測定し、見えのモード特性と明るさ評価特性との類似性を示した。山内ら¹⁴⁾は、表面色としての見えを呈する限界刺激輝度を求め、明るさ効率との関係を論じた。また、Uchikawa ら¹⁵⁾は、スペクトル色光に対するモード遷移と明るさ効率それぞれの波長特性を比較し、モード遷移の決定因は刺激の輝度ではなく明るさであることを明らかにしている。

ここで、見えのモード遷移に関する実験手法について考えてみる。色の見えのモード遷移閾値を求める実験手法には、次の二つがある。まず一つは、空間照度および刺激周辺輝度を一定に保ち、

本論文の一部は平成15年度照明学会全国大会で片山一郎が講演した。

刺激輝度を変化させてモード遷移閾値を設定する方法、いま一つは、刺激輝度を一定に保ち、空間照度および刺激周辺輝度を変化させる方法である。池田ら¹⁶⁾は、2種類のテスト刺激の見えについて、刺激呈示空間照度を変化させて検討しているが、これまでに得られた知見は、おもに前者の手法によるものである。しかし、両手法が等価であるという保証はない上、実生活では、刺激の輝度変化ではなく、空間照度変化に起因するモード遷移現象に遭遇する場合も多い。たとえば典型的なものとして、さまざまな照明環境下で使用される携帯電話機やパーソナルコンピュータのディスプレイ装置などがあげられる。また、これらのディスプレイ装置が使用される照明環境は、照度のみならず色度変化をも含むことから、自己発光刺激のモード遷移に与える照明光の色度の影響も重要な検討課題である。また、はじめに述べた異種画像メディア間での見えの一致がきわめて重要な分野としてDTPがあげられる。コンピュータディスプレイと印刷物との間で色の見えの一致を保つには、DTP作業環境の空間照度および照明光の色度の管理が重要である。これまでも、モード遷移に与える照明光の色度の影響について検討されているが¹⁷⁾、空間照度ではなく刺激輝度変化による知見である。DTP作業あるいは画像メディア利用者を含む空間の照明条件と色の見えのモード遷移との関係については、従来研究の知見に基づく推論にとどまらず、実験的検討が必要である。そこで、本研究では、被験者を含む空間の照度変化に起因する見えのモード遷移および照明光の色度がモード遷移に与える影響について検討する。実験1では、空間照度変化によって色の見えが表面色と開口色の両モード間を遷移する閾値を求め、明るさ効率B/L値との関係について検討する。実験2では、照明光の色度がモード遷移特性と明るさ効率特性に与える影響について検討する。

2. 実験1

2.1 実験装置

実験ブースは、被験者が自由に照度を設定できる構造であり、ブース正面の色刺激呈示面はN5、その他の内壁はN5.5相当の無彩色、床面は1.4Y5.5/1.7である。図1に実験ブースの概要を示す。ブース入口には遮光カーテンを設置し、実験中は外部からの光を遮断する。ブース正面に一辺5cmの正方形の開口をもうけ、その背後からCRTカラーディスプレイ（富士通製FMVD84Y）を用いて色刺激を呈示する。ブース内の照明がディスプレイ表面に直接反射することのないように、ディスプレイと開口部の距離お

図1 実験ブースの概要

Fig.1 Schematic diagram of the experimental booth.

よび角度を設定する。これにより、呈示色刺激の輝度は、実験ブース内の照度変化の影響を受けず一定となる。被験者は130cmの距離から両眼自然視で観察し、色刺激の視角は約 $2.2^\circ \times 2.2^\circ$ である。色刺激呈示面は、1,030mm $\times$ 728mmの無光沢厚紙であり、視角約 $43^\circ \times 31^\circ$ に相当する。

実験ブース天井に設置した光源は、3波長域発光形昼光色蛍光灯ランプ（二重環形100W、以下EXDと略記）であり、白色アクリル板で覆われ、輝度100%から約35%の範囲で調光可能である。白色アクリル板透過後の照明光の xy 色度座標は $(x,y) = (0.318, 0.339)$ であり、呈示色刺激周辺背景は $(x,y) = (0.318, 0.337)$ である。いずれも本実験の調光範囲において一定である。

呈示色刺激は32種類であり、それらの xy 色度座標を図2に示す。色刺激の平均輝度は約14.5 cd/m²である。図2中の大きな三角形は用いたカラーディスプレイの色再現可能領域を、□印は光源EXDの色度座標を、△印は実験2で用いる光源の色度座標をそれぞれ表している。色刺激の輝度、 xy 色度座標、 $L^*a^*b^*$ の各値、 ab クロマ、 ab 色相角を表1に示す。 $L^*a^*b^*$ の各値は、カラーディスプレイの最高輝度における白色点 $(x,y,Y) = (0.316, 0.343, 90.5)$ を完全拡散反射面とみなして算出した。色刺激を a^*b^* 平面上に表したものを図3に示す。各色刺激に付した番号は、表1の刺激番号に対応し、1から17および18から32の各刺激は、それぞれおおむね等彩度である。以後、刺激番号1から17を高彩度刺激群、18から32を低彩度刺激群とよぶことにする。

2.2 実験手順

実験ブース内照度を最高値に設定し、被験者を5分間照明光に順応させる。その間、色刺激は呈示しない。被験者正面の色刺激呈示面照度は約300 lxである。実験ブース内の照度を低下させると、色刺激の見えは、表面色モードから開口色モードへ遷移する。被験者には、呈示色刺激の見えのモードが遷移する照度に設定するよう指示する。その際、モード遷移点は、各被験者の内的判断基準によるものとする。また、呈示色刺激自体に順応することを防ぐため、色刺激のみを注視せず、視野全域を観察するようあわ

図2 呈示色刺激の xy 色度座標

Fig.2 xy chromaticity coordinates for the test stimuli used in the experiments.

表1 呈示色刺激の仕様

Table 1 Specification of test stimuli used in the experiments.

Stimulus No.	Y (cd/m ²)	x	y	L^*	a^*	b^*	C^*_{ab}	h_{ab} (deg)
1	13.9	0.275	0.501	46.1	-42.5	25.1	49.4	149.4
2	13.6	0.316	0.523	45.7	-34.8	34.6	49.1	135.2
3	13.8	0.367	0.517	46.0	-22.1	41.9	47.4	117.8
4	14.1	0.402	0.491	46.4	-10.3	42.9	44.1	103.5
5	14.4	0.437	0.468	46.9	1.3	44.6	44.7	88.3
6	14.8	0.468	0.445	47.4	12.5	45.6	47.3	74.7
7	15.2	0.481	0.411	48.0	23.1	39.5	45.7	59.7
8	14.7	0.485	0.374	47.3	33.1	30.1	44.7	42.3
9	15.1	0.479	0.336	47.9	43.0	19.8	47.4	24.7
10	15.1	0.441	0.310	47.9	43.0	7.5	43.7	9.9
11	15.1	0.403	0.280	47.9	44.0	-4.7	44.2	353.9
12	14.9	0.359	0.248	47.6	44.5	-18.4	48.2	337.6
13	15.3	0.299	0.227	48.1	34.9	-30.8	46.5	318.6
14	14.6	0.245	0.201	47.1	26.5	-43.9	51.3	301.1
15	14.6	0.220	0.204	47.1	14.9	-45.2	47.5	288.2
16	14.5	0.202	0.208	47.0	5.1	-45.3	45.6	276.4
17	14.3	0.189	0.211	46.7	-2.4	-45.4	45.4	267.0
18	13.7	0.245	0.388	45.8	-31.6	1.8	31.6	176.8
19	13.8	0.296	0.424	46.0	-23.6	13.6	27.3	150.0
20	13.9	0.326	0.466	46.1	-23.3	25.1	34.2	133.0
21	14.1	0.357	0.443	46.4	-11.8	24.9	27.5	115.3
22	14.5	0.418	0.454	47.0	0.0	37.3	37.3	90.0
23	14.7	0.421	0.406	47.3	11.1	27.0	29.2	67.7
24	15.0	0.424	0.380	47.7	23.4	17.2	29.1	36.3
25	15.5	0.411	0.318	48.4	33.4	5.5	33.9	9.4
26	15.3	0.370	0.283	48.1	34.2	-7.8	35.1	347.2
27	14.8	0.307	0.259	47.4	23.9	-20.7	31.6	319.2
28	14.4	0.251	0.232	46.9	14.9	-33.3	36.5	294.1
29	14.3	0.226	0.238	46.7	3.0	-33.9	34.0	275.0
30	14.2	0.207	0.243	46.6	-6.9	-33.8	34.5	258.6
31	14.1	0.213	0.285	46.4	-18.0	-22.5	28.8	231.4
32	14.2	0.225	0.337	46.6	-27.4	-9.9	29.1	199.8

表2 無彩色参照刺激の輝度値

Table 2 Luminance values of the gray-scale used for brightness matching.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Y (cd/m ²)	76.0	65.2	54.6	45.8	38.8	31.3	25.0	19.2	14.9	11.1	7.7	5.2	3.4

休息時間をもうけ、各群とも10セッション行った。

各色刺激の明るさ効率 B/L 値は、前述のモード閾値の測定と同一の装置を用いて求めた。まず、実験ブース内照度を最高値に設定し、被験者を5分間照明光に順応させる。本実験中は呈示刺激の見えが表面色モードを保つように、順応後もブース内照度を最高値に固定する。そのときの刺激周辺の背景輝度は約19cd/m²である。評価対象色刺激と無彩色参照刺激を交互にCRTカラーディスプレイを用いて呈示し、調整法により明るさマッチングを行わせる。その際、色刺激は一定輝度とし、被験者は、マンセルバリュー3.0から9.0の範囲で0.5ステップに相当する13段階の無彩色参照刺激系列から、もっとも明るさが近いものを選択する。用いた無彩色参照刺激の輝度値を表2に示す。色刺激は、高彩度、低彩度それぞれの刺激群内でランダムな順序で呈示し、一つの群すべての色刺激に対する評価で1セッションとする。セッション間では被験者の要求に応じて適宜休息時間をもうけ、高彩度刺激群、低彩度刺激群いずれも5セッション行った。なお、各被験者に対して、明るさマッチング方法についての教示をかねて、あらかじめ高低刺激両群について練習セッションを各1回もうけた。

被験者は、MN (21歳、女性)、YH (22歳、男性) および IK (37歳、男性) の3名で、いずれも視覚心理実験の経験を有し、100色相配列検査で確認した色覚正常者である。

2.3 結果と考察

各色刺激に対するモード遷移閾値と B/L 値を図4に示す。(a)は高彩度刺激群、(b)は低彩度刺激群の結果である。図4において、縦軸はモード遷移閾値および B/L 値を、横軸は色刺激の ab 色相角（以下色相角と略記）をそれぞれ示し、誤差棒は測定結果の標準偏差を示している。モード遷移閾値および B/L 値は、それぞれ式(2)および式(3)で定義する。

$$\text{モード遷移閾値} = \log(L_0/L_1) \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 L_0 は呈示色刺激の見えのモードが表面色と開口色の間を遷移する背景の輝度、 L_1 は呈示色刺激の輝度である。

$$B/L \text{ 値} = \log(B/L) \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 B は呈示色刺激と等明るさの無彩色刺激の輝度、 L は呈示色刺激の輝度である。実験結果は、一定輝度の呈示色刺激に対して、空間の照度をコントロールすることで見えのモード遷移閾値を安定して設定できることを示している。図4を通覧すると、いずれの被験者においても、モード遷移閾値および B/L 値は色刺激の色相角に対して一定とならず、色相角180°から270°の範囲すなわち緑から青色相にかけて大きくなる傾向が認められる。つまり、緑から青色相にかけての色刺激は明るさが高く評価され、空間照度の高い状態で見えのモードが表面色から開口色へ遷移していることを示している。

ところで、本実験では B/L 値を色刺激の見えのモードが表面色となる条件で測定しているが、 B/L 値は見えのモードによって変化することが指摘されている⁶⁾。そこで、開口色モードでの各色刺激の B/L 値を求め、両モード間での差異について検討する。実験ブース内の照度を調光可能範囲の下限に設定し、前述の表面色モードでの B/L 値測定と同様の手順で求める。この場合の背景輝度は約6.5cd/m²である。被験者はMNとIKの2名である。両被

図3 a^*b^* 平面上の呈示色刺激

Fig.3 Test stimuli on the a^*b^* plane. Figures attached correspond to stimulus nos. shown in Table1.

せて指示する。照度の設定には、調整法を用いる。ブース内照度がモード遷移点に設定された時点で一旦色刺激を消去し、色刺激呈示面の刺激周辺の輝度を測定、記録する。刺激呈示背景の輝度の測定には、ミノルタ製色彩輝度計CS-100および同データプロセッサDP-100を用いた。

色刺激は、高彩度、低彩度それぞれの刺激群内でランダムな順序で呈示し、一つの群すべての色刺激に対する評価をもって1セッションとする。セッション間では被験者の要求に応じて適宜

(a)High Chroma Stimuli

(b)Low Chroma Stimuli

図4 色刺激に対するモード遷移閾値および B/L 値

Fig.4 Mode transition thresholds and B/L values as functions of hue angle of the stimulus for observers MN, YH and IK.

(a)High Chroma Stimuli

(b)Low Chroma Stimuli

図5 表面色および開口色モードでのモード遷移閾値の比較

Fig.5 Comparison of mode transition thresholds between the surface-color and the aperture-color modes.

験者の測定結果を図5に示す。(a)は高彩度刺激群、(b)は低彩度刺激群の結果である。図5において、縦軸は B/L 値を、横軸は呈示色刺激の色相角をそれぞれ示し、図中の誤差棒は、開口色モードにおける測定結果の標準偏差である。両被験者とも、開口色モードにおける B/L 値は、表面色モードでの値と比較してやや低下す

る傾向があるが、両モード間で同様の色度依存性が認められる。両モード間で単相関係数を求めると、被験者MNについては、高彩度刺激群で0.903、低彩度刺激群で0.956、同様に被験者IKについては、それぞれ0.940、0.970であり、いずれも非常に高い値となり、無相関検定の結果、1%水準で有意であった。以上の結

果から、順応輝度によって B/L 値は変化するが、相対的な色度依存性は保たれるといえる¹⁸⁾¹⁹⁾。つまり、 B/L 値の相対的な色度依存性を議論するには、表面色モードと開口色モードのいずれの条件下での測定値を用いることも可能である。本研究では、色刺激の見えの記述を含めて、 B/L 値は表面色モードでの測定値を用いて検討をすすめる。

次にモード遷移閾値と B/L 値の両特性の関係について検討する。図6に各被験者のモード遷移閾値と B/L 値との単回帰分析結果を示す。(a)は高彩度刺激群、(b)は低彩度刺激群の結果である。高彩度刺激群、低彩度刺激群いずれの条件においても、全被験者で高い相関が認められ、いずれも無相関の検定の結果、1%水準で有意であった。この結果は、色刺激に対するモード遷移知覚と明るさ知覚の密接な関係を示唆している。

モード閾値および B/L 値特性を被験者間で比較した結果を図7に示す。(a)は高彩度刺激群、(b)は低彩度刺激群に対する結果である。被験者 MN は高彩度、低彩度いずれの刺激群においても高いモード遷移閾値を示し、被験者 IK は低い値を示す。 B/L 値の結果を考慮すると、被験者 MN は、色刺激の明るさ評価が高く、空間照度の高い状態で表面色から開口色へのモード遷移を知覚したと考えられる。被験者 YH は、被験者 IK と比較して B/L 値が低いにもかかわらずモード遷移閾値が被験者 IK よりも高くなる傾向が認められる。実験手順で述べたとおり、モード遷移点の見えを具体的に被験者に教示することができないため、モード遷移閾値には、色刺激の明るさ評価とともに、モード遷移を判断する内的基準の差異が影響していると考えられる。ここで言う内的基準とは、心理的確率曲線を指すのではなく、最終的にどのような見えに対してモード遷移点と判断するかという意味である²⁰⁾。つまり、被験者 YH は、表面色から開口色へ見えのモードが遷移す

るごく初期の段階で判定しているのに対して、被験者 IK は、より開口色としての見えに遷移した段階でモード遷移閾値と判定していると考えられる。しかし、いずれの被験者においても、モード遷移閾値および B/L 値の色度依存特性は共通し、モード遷移の判断基準についての内観報告も共通して、灰色みの消失と蛍光の発現をあげている。これは、Evans ら¹⁰⁾¹¹⁾の zero grayness point 近傍での内観報告と一致する。また、 B/L 値の最大値と最小値のレンジは、モード遷移閾値に比較して大きくなっている。これは、本実験が採用した離散的な参照刺激との明るさマッチングをとる近似的な調整法に起因したものと考えられる。なお、被験者 YH の B/L 値の一部に負値がみられるが、明るさ評価に対する色みの寄与を考慮すると理論的にはとりえない値である。しかし、正常色覚者においても負の B/L 値をとる例が複数の先行研究でみられる^{6)21)~24)}。これは、モード遷移点と同様に、見えの異なる色刺激間で、明るさマッチング点と判断する主観的基準が被験者によって異なることが原因と考えられる²⁰⁾。

各被験者についてモード遷移閾値特性を高彩度、低彩度の両刺激群で比較した結果を図8に示す。被験者 MN については、わずかに高彩度刺激群におけるモード遷移閾値が低彩度刺激に比較して上回る領域が認められるが、おおむねいずれの被験者についても刺激の彩度差によるモード遷移閾値の変化はないと言える。同様に B/L 値を両刺激群で比較した結果を図9に示す。 B/L 値特性についてもモード遷移閾値の場合と同様に、高彩度、低彩度両刺激群間で明確な差異は認められない。これらの結果は、実験に用いた両刺激群間での彩度差が小さかったことが原因と考えられる。

次に、モード遷移の決定因について考察する。被験者は実験中、実験ブースの天井の光源を見ることも可能であった。しかし、光

図6 モード遷移閾値と B/L 値との関係

Fig.6 Relationship between mode transition thresholds and B/L values for observers MN, YH and IK.

(a) High Chroma Stimuli

(b) Low Chroma Stimuli

図7 モード遷移閾値およびB/L値の被験者間での差異

Fig.7 Difference of mode transition thresholds and difference of B/L values among observers.

源の輝度範囲は約2700cd/m²から約7500cd/m²と呈示色刺激に比較して圧倒的に高輝度であり、モード遷移の決定因とは考えにくい。山口ら²⁵⁾は、空間の明るさ感、開口色と知覚される物体の輝度ではなく、表面色として知覚される物体の最高輝度により決定されることを明らかにしている。本実験では、表面色として知覚される最高輝度の物体は、実験ブース内壁と刺激周辺背景である。呈示色刺激の色相角による明るさ評価の差異は、色みの明るさ知覚への寄与の差異に起因しており、実験ブース内壁、とくに被験者正面に位置する刺激周辺背景の見える明るさと色刺激の明るさが一定の比率に達した状態がモード遷移点と考えられる。つまり、色の見えるモード遷移条件を明るさで記述すると、色度依存性はなくなると考えられる。

モード遷移閾値の最小値と最大値のレンジを各被験者についてみると、高彩度刺激群に対してMN, YH, IKはそれぞれ0.21, 0.10, 0.16, 低彩度刺激群に対して0.20, 0.08, 0.14である。山内ら¹⁴⁾は、CRTディスプレイを用いて色刺激を呈示し、無彩色背景の輝度を一定に保つ条件下で、表面色モードの限界色刺激輝度を求めている。彼らが用いた背景はN1, N5, N9の3種類で、N5背景の輝度は9.45cd/m²である。また、モード判断の手がかりを与える目的で、呈示刺激周辺に8色の有彩色を配置しているため、それらを含む刺激周辺の平均輝度は13.7 cd/m²である。本実験でモード遷移閾値として設定した背景輝度の平均値は12.11 cd/m²であることから、両実験はほぼ同等の輝度水準で行われたとみなすことができる。本実験の呈示色刺激に相当する色度領域について、限界色刺激輝度の最小値と最大値のレンジをみると、彼らの被験者5名の平均値は対数値で約0.5である。本実験の結果と比較すると、

実験誤差に帰するには大きすぎる差異である。納谷ら¹⁹⁾²⁶⁾²⁷⁾は、Helmholtz-Kohlrausch効果は実験手法に依存して実験結果が大きく異なることを明らかにしている。つまり、有彩色刺激の輝度を変化させて一定輝度の無彩色参照刺激と明るさマッチングを行う可変有彩色法(VCC法)による実験結果は、無彩色刺激の輝度を変化させて一定輝度の有彩色刺激と明るさマッチングを行う可変無彩色法(VAC法)のそれと比較して対数尺度で約2倍の値になることが示されている。モード遷移が色刺激と背景あるいは空間内の表面色モード刺激との明るさマッチング点近傍で生じることから、見えるモード実験においてもHelmholtz-Kohlrausch効果と同様に、実験手法に起因する差異が生じると考えられる。つまり、本実験方法はVAC法に、山内らのそれはVCC法に相当し、色刺激輝度と背景輝度のどちらを可変するかは等価な選択ではなく、実験方法によって測定値が大きく異なることになる。そのため、色刺激輝度を可変する実験手法で得られたモード遷移の測定結果は、空間照度変化に起因する色刺激の見えるモード遷移現象の予測に、直接的には適用できないことになる。

3. 実験2

3.1 実験装置・手順

実験1と同様の装置を用い、光源のみ3波長域発光形電球色蛍光ランプ(二重環形100W, 相関色温度約3200K, 以下EXLと略記)としてモード遷移閾値とB/L値を測定した。照明光の色度座標は(x,y)=(0.428, 0.408)であり、図1に△印で示す。色刺激呈示背景の色度座標は(x,y)=(0.432, 0.414)である。照明光および色刺激呈示背景の色度は、調光にかかわらず一定である。本実験条

図8 モード遷移閾値の刺激彩度による差異
Fig.8 Comparison of mode transition thresholds between the high chroma and the low chroma stimuli for observers MN, YH and IK.

図9 B/L 値の刺激彩度による差異
Fig.9 Comparison of B/L values between the high chroma and the low chroma stimuli for observers MN, YH and IK.

件では、呈示色刺激の色度は照明光の色度変化に関わらず一定であるため、EXL 照明光に順応した状態では、各刺激に対する見えは大きく変化する。各呈示色刺激の EXD 照明光下での対応色を CIE 色順応予測式²⁸⁾を用いて算出し、 a^*b^* 平面上に置点したものを図10に示す。図中の数字は刺激番号である。CIE 色順応予測式の適用にあたっては、試験照度および基準照度は300 lx、ノイズ値は1に設定した。B/L 値の測定は実験1と同様に表面色モードで行うが、無彩色参照刺激の色度値は EXL 照明光の色度に一致させておく。被験者は、実験1と同様、MN, YH, IK の3名である。

3.2 結果と考察

光源を EXL とした場合の各色刺激に対するモード遷移閾値と B/L 値を図11に示す。(a)は高彩度刺激群、(b)は低彩度刺激群に対する結果である。実験1と同様、モード遷移閾値は10セッションの平均値、B/L 値は5セッションの平均値であり、図中の誤差棒は測定結果の標準偏差を示している。なお、図11の横軸は、呈示刺激番号である。

図11を通覧すると、EXD 照明光下と同様に、モード遷移閾値と B/L 値の間には共通した色度依存性が認められる。単相関係数を求めたところ、被験者 MN では高彩度刺激群において0.873、

図10 EXL 照明光順応時の呈示色刺激の a^*b^* 平面上の分布
Fig.10 Test stimuli on the a^*b^* plane under the illuminant EXL.

図11 EXL 照明光下での色刺激に対するモード遷移閾値および B/L 値
Fig.11 Mode transition thresholds and B/L values as functions of stimulus no. under the illuminant EXL

低彩度刺激群において0.947, 同様に被験者 YH ではそれぞれ 0.817, 0.860, 被験者 IK では0.886, 0.921と高い値となり, いずれも無相関の検定の結果, 1%水準で有意であった.

次に, 照明光の色度変化にともなうモード遷移閾値と B/L 値の変化について検討する. 図10に示したとおり, EXL 照明光順応時, 高彩度刺激群は a^*b^* 平面のすべての象限に分布するが, 低彩度刺激群は第一象限には分布せず, 大半は第三, 第四象限に分布している. そのため, 低彩度刺激群について各刺激の色みを色相角で記述すると, EXL 照明光下では色相の分布範囲が限定されてしまう. できるだけ広い色相角の範囲において比較検討するため, ここでは高彩度刺激群に注目する.

図12に EXD および EXL 照明光下それぞれのモード遷移閾値および B/L 値を示す. (a)はモード遷移閾値について, (b)は B/L 値について比較した結果であり, それぞれ横軸は, 色刺激の色相角を表している.

3名の被験者に共通して, EXL 照明光下でのモード遷移閾値および B/L 値は, 色相角30°から170°の範囲で EXD 照明光下での値に比較して小さくなり, 色相角280°から300°にかけて大きくなる. また, 色相角320°を超えると, 被験者間で若干差異があるものの, 再び EXD 照明光下に比較して小さくなっている. 以上のように, モード遷移閾値および B/L 値の照明光色度変化による色度依存特性の変化には, 共通性が認められる.

次に, 呈示色刺激の各照明光での見えの彩度とモード遷移および明るさ知覚との関係を検討する. EXD, EXL 両照明光下の各高彩度刺激の ab クロマ C_{ab}^* 値を図13に示す. EXD 照明光下ではほぼ等彩度となるように設定した各色刺激が, EXL 照明光に対する色順応効果により彩度が大きく変化し, 両照明光下での C_{ab}^* 値の相対的な関係は, 図12における関係と一致している. つまり, 色相角30°から170°および色相角320°から360°の範囲では, EXL

照明光下では色刺激の見えの彩度が低下することで B/L 値が低下し, それにともないモード遷移閾値も低下したと考えられる. 色相角280°から300°にかけてのモード遷移閾値の上昇も同様に説明できる.

以上, 照明光に対する色順応効果によって色刺激の見えが変化した場合においても, モード遷移閾値と B/L 値との間に高い相関が認められる事実は, 色刺激の見えのモード遷移知覚と明るさ知覚との密接な関係を示すものである. ただ, それらの因果関係, つまりモード遷移が明るさ知覚メカニズムのみで決定されるか否かについては, 更なる検討が必要である.

4. 結言

CRT カラーディスプレイを用いて一定輝度の色刺激を呈示し, 被験者を含む空間の照度を変化させることで, 色刺激の見えのモードを変化させた. モード遷移閾値と色刺激の明るさ効率との関係, および照明光に対する色順応効果の影響について検討した. 得られた知見を要約すると, 以下のとおりである.

- (1) 色刺激の見えのモード遷移閾値と明るさ効率との間には高い相関が認められ, 色の見えのモード遷移と明るさ知覚メカニズムとの間には密接な関係がある.
- (2) 色刺激のモード遷移は輝度ではなく, 刺激周辺との明るさの関係で決まる.
- (3) モード遷移実験において, 無彩色背景と色刺激のいずれの輝度を変化させるかは等価な選択ではなく, Helmholtz-Kohlrausch 効果実験と同様, 手法によって測定値が大きく異なる.
- (4) 照明光に対する色順応効果は, 色刺激の見えのモード遷移知覚と明るさ知覚に共通した影響を与える.

(a) Mode Transition Thresholds

(b) B/L Values

図12 モード遷移閾値および B/L 値の照明光間での比較

Fig.12. Comparison of mode transition thresholds and B/L values between illuminants EXD and EXL.

図13 EXD と EXL 照明間での色刺激のクロマ C^*_{ab} 値の比較

Fig.13. Comparison of C^*_{ab} values of the high chroma stimuli between illuminants EXD and EXL.

参考文献

- (1) D.Katz: The world of colour, Kegan Paul, London, pp.7-28 (1935).
- (2) S.Ullman: On Visual Detection of Light Sources, Biol. Cybernetic, 21, pp.205-212 (1976).
- (3) H.Uchikawa, K.Uchikawa and R.M.Boynton: INFLUENCE OF ACHROMATIC SURROUNDS ON CATEGORICAL PERCEPTION OF SURFACE COLORS, Vision Res., 29-7, pp.881-890 (1989).
- (4) F.Bonato and A.L.Gilchrist: The perception of luminosity on different backgrounds and in different illuminations, Perception, 23, pp.991-1006 (1994).
- (5) P.Heggelund: ACHROMATIC COLOR VISION- I: PERCEPTIVE VARIABLES OF ACHROMATIC COLORS, Vision Res., 14, pp.1071-1079 (1974).
- (6) 岡嶋, 阿山, 内川, 池田: 光源色モードと表面色モードにおける明るさ効率の比較, 光学, 17-11, pp.582-592 (1988).
- (7) H.Shinoda, K.Uchikawa and M.Ikeda: Categorized Color Space on CRT in the Aperture and the Surface Color Mode, Color Res. Appl., 18-5, pp.326-333 (1993).
- (8) 池田, 本永, 松澤, 石田: 色パターンの照明認識視空間と局所照明認識閾, 光学, 22-5, pp.289-298 (1993).
- (9) 池田, 福村, 松澤, 石田: 局所照明認識閾に対する周辺視覚情報の影響, 光学, 23-1, pp.42-49 (1994).
- (10) R.M.Evans and B.K.Swenholt: Chromatic Strength of Colors: Dominant Wavelength and Purity, J. Opt. Soc. Am., 57-11, pp.1319-1324 (1967).
- (11) R.M.Evans: THE PERCEPTION OF COLOR, John Wiley & Sons, pp.99-128 (1974).
- (12) Y.Nayatani, H.Sobagaki and K.Hashimoto: Relation between Helmholtz-Kohlrausch Effect, Purity Discrimination, and G_0 Function, J. Light & Vis. Env., 17-2, pp.16-24 (1993).
- (13) 鯉田, 内川: 色光の見えのモードと明るさとの色度特性比較, Vision, 8, pp.143-148 (1996).
- (14) 山内, 内川, 栗木: 表面色モード知覚のための限界輝度条件, 映像情報メディア学会誌, 52-2, pp.227-234 (1998).
- (15) K.Uchikawa, K.Koida, T.Meguro, Y.Yamauchi, and I.Kuriki: Brightness, not luminance, determines transition from the surface-color to the aperture-color mode for colored lights, J. Opt. Soc. Am. A, 18-4, pp.737-746 (2001).

- (16) 池田, 篠田, 内田: 景色の照度増大にともなうテスト刺激の照明認識視空間内部への移行, 照学誌, 81-11, pp.1004-1009 (1997).
- (17) J.M.Speigle and D.H.Brainard: Luminosity thresholds: effects of test chromaticity and ambient illumination, J. Opt. Soc. Am. A, 13-3, pp.436-451 (1996).
- (18) Y.Nayatani, H.Sobagaki and K. Hashimoto: Illuminance Dependency of L/Y (Lightness/Luminance-Factor)-Ratio Effect, Color Res. Appl., 18-3, pp.171-177 (1993).
- (19) 納谷, 田中, 田中: 物体色および光源色の Helmholtz-Kohlrausch 効果の予測 - I. 無彩色可変法の場合の推定, 照学誌, 82-2, pp.131-136 (1998).
- (20) Y.Nayatani and H.Sobagaki: Causes of Individual Differences on Brightness/Luminance (B/L) Ratios, J. Light & Vis. Env., 27-3, pp.30-34 (2003).
- (21) D.H.Alman: Errors of the Standard photometric system when measuring the brightness of general illumination light sources, J. Illum. Eng. Soc., 7, pp.55-62 (1977).
- (22) G.Wyszecki and W.S.Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Ed, John Wiley & Sons, pp.411-415 (1982).
- (23) M.Ayama and M.Ikeda: Brightness-to-Luminance Ratio of Colored Light in the Entire Chromaticity Diagram, Color Res. Appl., 23-5, pp.274-287 (1998).
- (24) H.Yaguchi A.Kawada, S.Shioiri, and Y.Miyake: Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness, J. Opt. Soc. Am., 10-6, pp.1373-1379 (1993).
- (25) 山口, 篠田, 池田: 照明認識視空間の明るさサイズの測定による実環境における空間の明るさ感の評価, 照学誌, 86-11, pp.830-836 (2002).
- (26) 納谷, 田中, 田中: 物体色および光源色の Helmholtz-Kohlrausch 効果の予測 - II. 有彩色可変法の場合の推定, 照学誌, 82-2, pp.131-142 (1998).
- (27) 納谷: Helmholtz-Kohlrausch 効果における VAC 法と VCC 法の関係, 照学誌, 82-2, pp.143-152 (1998).
- (28) CIE, A Method of Predicting Corresponding Colours under Different Chromatic and Illuminance Adaptations, CIE Publ.

No.109-1994, CIE, Vienna (1994).

(受付日2003年9月29日/採録日2004年4月9日)

片山 一郎 (正会員)

宮城工業高等専門学校情報デザイン学科
〒981-1239 宮城県名取市愛島塩手字野田山48
昭和40年1月19日生まれ。平成15年3月神戸大学大学院総合人間科学研究科博士後期課程修了。同年4月宮城工業高等専門学校情報デザイン学科助教授。博士(学術)。日本色彩学会, 日本光学会, 日本インテリア学会, 日本建築学会各会員。

榎見 和孝 (専門会員)

放送大学兵庫学習センター
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町2-1
昭和11年6月19日生まれ。昭和41年3月神戸大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。昭和42年神戸大学工学部勤務。平成12年4月神戸大学名誉教授。現在, 放送大学客員教授・兵庫学習センター所長。光環境機能に関する研究に従事。工学博士。昭和49年照明学会研究奨励賞, 昭和61年照明学会賞受賞。電気学会, 人間・環境学会各会員。

青木 務 (非会員)

神戸大学発達科学部人間環境科学科
〒657-8501 神戸市灘区鶴甲3-11
昭和21年12月2日生まれ。昭和50年5月京都大学大学院農学研究科博士課程単位修得退学。昭和50年京都大学木材研究所勤務。現在, 神戸大学発達科学部教授。住環境材料に関する研究に従事。農学博士。日本木材学会, 日本家政学会, 日本インテリア学会各会員。