



白色光における輝面色モードと表面色モードの見えの定式化

岡嶋 克典・池田 光男

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1989年4月17日受理)

Quantitative Analysis of a Luminous Color Mode and a Surface Color Mode for Achromatic Lights

Katsunori OKAJIMA and Mitsuho IKEDA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School,
4259, Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 227

In color appearance, two modes are well known: Luminous color mode in which colors appear as emitting from a primary light source. Surface color mode in which colors appear as belonging to a surface on which light is diffusely reflected or radiated. The color appearance in these two modes is quite different. In the present paper, we manipulated the appearance mode of the same Munsell achromatic color chips by changing the background luminance conditions and quantitatively measured the state of appearance mode. The test stimulus appearance shifted from the surface color mode to the luminous color mode as test luminance increased. The slopes of the shift decreased as the background luminance increased. With the results, we presented an equation predicting the color appearance as a function of test and background luminance.

1. はじめに

われわれの知覚する色は、その見え方によってさまざまな種類に区別することができる。たとえば、輝面色 (luminous color) と表面色 (surface color) という区別の仕方がある。輝面色とは、一般には光源色と呼ばれているものであるが、われわれはここでは輝面色と呼ぶことにする。輝面色とは自己発光体から直接放射されているように知覚される物体感を感じない色のことで、表面色とは照明されている物体表面を知覚させる色のことである。これらの区別は、それが実際に発光しているか否かによらず、人間がある光刺激を見たときに、それをどのように知覚しているかで決定される。

輝面色として知覚している状態を輝面色モードの見えといい、表面色として知覚している状態を表面色モードの見えという。両モード間の見えは、物理的な測光値が同じであっても明らかに異なり、それぞれ特徴的な様相を呈する。この見えのモードの違いは、刺激の周辺条件などの呈示状態の違いから生じてくる。たとえば、リダクションスクリーンを通して物体表面を見ると、輝面色

(あるいは開口色) モードに見えることはよく知られていることである。これとは逆に、CRT や VDT は発光体による光を疑似的に表面色に見せる働きを有している。

最近、測光量が同じ光でも明るさ効率 B/L の値が異なる¹⁾ことや、見えのモードが違うとカテゴリカル的な色の応答が異なること²⁾がわかってきている。したがって、本来輝面色である CRT の画像を、本来表面色である印刷物にカラープリンターなどで出力した場合、色のモードも含めた色情報の変換方式が不適当だと望みの色を得られないという事態が生じるであろう。あるいは明るさや色の見えを議論する際、どのモードで実験を行なったかを考慮しないと、他のデータと比較できないという問題も起こる¹⁾と考えられる。このようなことから、色光の見えのモードを定量的に取り扱う方法が、これから必要となってくると考えられる。そこで本研究では、白色色票による白黒刺激の見えのモードを、被験者が主観的に得点化する実験を行ない、その結果から見えのモード状態方程式を提案し、色見えを定式化することを試みた。

2. 方 法

2.1 刺 激

色票を使って輝面色モードと表面色モードの見えを作るために, 刺激だけが暗黒中に浮いて見えるブースを使用して実験を行なった¹⁾. 刺激となる色票は, 水平棒に対して直角にマジックテープで固定し, 2台のハロゲンスライドプロジェクターで斜め前から照明した. 被験者の正面にはシャッターを設置し, 実験者が刺激を交換している間は被験者に刺激が見えないようにした. また, シャッターが閉じている間は被験者の頭上にあるハロゲンランプを点灯し, 被験者が完全に暗順応しないように配慮した. 照度レベルは2種類で, 照度の調整はプロジェクターの前に ND フィルターを入れて行なった. 刺激の呈示位置と被験者までの距離は 1 m である.

Fig. 1 が呈示された刺激で, (a) が背景刺激なし, (b) が背景刺激ありの場合を示す. 中央のテスト刺激のサイズは 5 cm × 5 cm (視角 2.9° × 2.9°) で, 背景刺激のサイズは 14 cm × 14 cm (視角 8.0° × 8.0°) である. 今回, テスト刺激にはマンセルバリュウ 2~9 のグレースケール 8 枚を使用した. 背景刺激としては N 0.25, N 3, N 6, N 9 のグレースケールを採用した.

2.2 手 順

被験者は呈示された刺激を観察し, テスト刺激が「輝面色モード」に見える割合と「表面色モード」に見える割合をそれぞれ評価する. このとき, 輝面的な見えと表面的な見えに対しての得点の合計が 10 点になるように, それぞれの評価に得点を割り当てる. たとえば, 刺激が完全に輝面色に見えるときは「輝面色モード 10」, 物体の表面としてしか見えないときは「表面色モード 10」, 輝面色にも表面色にも見えて区別できないときは「輝面色モード 5, 表面色モード 5」というように応答する. 得点は整数に限らず, 0.5 などでも許した. 一つの刺激に被験者が応答した後, 実験者はシャッターを閉じ, 水平棒の先に次の刺激をランダムな順序で貼り替えた. 被験者は応答するまで刺激を見ることができたので, 呈示時間は一定ではなかったが通常数秒であった.

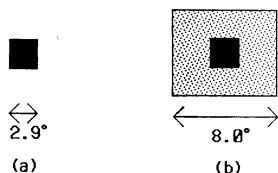


Fig. 1 Stimulus dimensions, (a) no background, (b) with a background.

測定回数については, 同一条件に対して 5 回, ないしは 10 回行なっている.

2.3 被 験 者

被験者は, KO (25 歳, 男), KU (37 歳, 男), KS (24 歳, 男), MA (33 歳, 女) の計 4 名で, 全員色覚正常である. KS と MA は一つの照度レベルのみ実験を行なった.

3. 結 果

二つの照度レベルの結果は, 刺激をすべて輝度値で表わすことによって統一し, 一緒にプロットした. Fig. 2 に 4 人の被験者の結果を示す. 横軸はテスト刺激の輝度値 L_t を, 縦軸はそのテスト刺激に対して応答した輝面色モードの得点 P_t の平均値を示し, データ点の縦棒は標準偏差である. 縦軸の 0 は表面色モードの得点 10 に相当する. シンボルの違いは背景刺激の輝度 L_b の違いを表わし, 白抜きと黒塗りの違いは照度レベルの違いを示している.

Fig. 2 の結果は, テスト刺激の輝度が増加するにつれてテスト刺激の見えが表面色モードから輝面色モードに徐々に移行し, 色票であっても明るくしていくと輝面色モードの見え方になることを示している. この傾向は, 背景強度を上げるとテスト刺激に黒が誘導され, 白がキャンセルされるという Fuld³⁾ らの結果と一致している. われわれの場合にも, テスト刺激の輝度を上げて輝面色モードが優勢になるにつれて黒味が消えていき, 白味が増えながら輝いていくのが観察された.

また, 背景条件が違くとテスト刺激の輝度によるモード変化の効果が異なり, 背景の輝度を上げるとテスト刺激の輝度もそれに応じた高いところでない輝面色モードにならないことがわかる. この傾向は, 背景輝度を上げるとテスト刺激の見えが表面色モードになっていくという前回の報告¹⁾と一致する.

被験者間の比較においては, KO (a), KU (b), MA (c) の結果はよく似ているといえるが, KS (d) の背景輝度が低い結果が他の被験者とかなり異なっている. 被験者 KS は, 他の被験者に比べて背景輝度が低い場合でも輝面色モードの得点が低く, 表面色モードと見る傾向が強いことがわかる. このことから, 見えの判定基準には個人差があり, とくに背景輝度が低い場合に差が大きいことが示唆される.

ところで, 背景条件によってはモード変化の推移が完全でないものがあるが, これは刺激に色票を用いたために, 使用できる輝度範囲が制約され, モードを変化させ

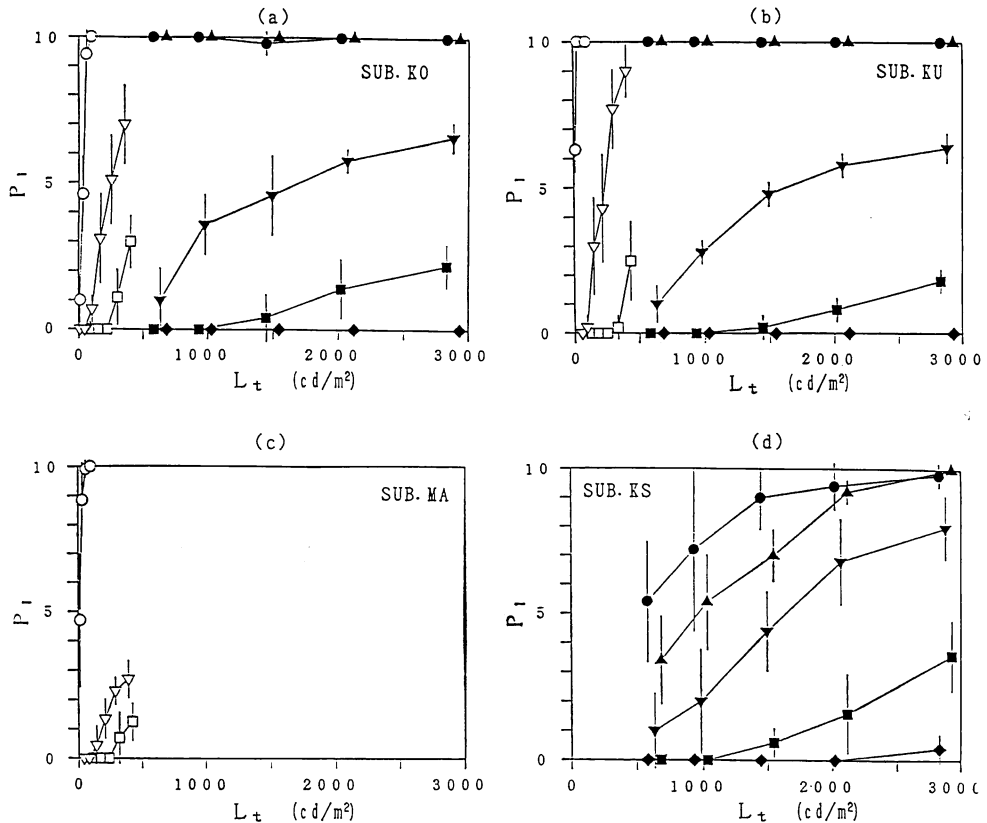


Fig. 2 Point values of luminous color mode, P_1 , plotted against test stimulus luminance, L_t . The background conditions are none (\circ), 32 cd/m^2 (∇), 153 cd/m^2 (\square) for the low luminance condition, and none (\bullet), 11 cd/m^2 (\blacktriangle), 330 cd/m^2 (\blacktriangledown), 1496 cd/m^2 (\blacksquare), 3860 cd/m^2 (\blacklozenge) for the high luminance condition. Bars of the standard error are shown when the errors are larger than the symbol sizes. Observers: KO (a), KU (b), MA (c) and KS (d).

るだけのテスト刺激の輝度を与えられなかったためと考えられる。

4. 見えのモードの定式化

本実験で使用した刺激は、テスト刺激と背景刺激のみによって構成されており、そのどちらも白色色票である。したがって、テスト刺激の見えは、テスト刺激の輝度 L_t と背景刺激の輝度 L_b で決定されると考えることができる。そこで、テスト刺激の輝面色モードの見えの得点 P_1 を、 L_t と L_b の関数で定式化することを試みる。

今回の実験では、見えのモードの変化を、持ち点10で輝面色モードと表面色モードに配分することによって調べた。したがって、Fig. 2 に示したようなテスト刺激の輝度を高くしていくと輝面色モードの得点 P_1 は10で飽和し、完全に輝面色モードになったということにな

る。しかし、実際は同じ輝面色モード10点でも、輝度を上げていくとさらに明るく輝いていくのが観察された。また、逆にテスト刺激の輝度を下げていくと輝きが消えて黒味が現われ、輝面色モードの得点は0、すなわち表面色モード10で飽和するが、その後もさらに暗い黒になっていった。このことから、光の輝き度が強くなると輝面色モードになり、輝きが消えて黒味が現われると表面色モードになると考えられる。

そこで、テスト刺激の輝き度に対応する視覚系における出力関数を考え、その出力がある値以下のときは完全に表面色モードに見え、ある値以上になると完全に輝面色モードに見えると仮定する。Fig. 3 は、Fig. 2 の横軸を $\log(L_t+1)$ に変換し、縦軸の値が $0.5 \leq P_1 \leq 9.5$ の範囲のシンボルのみをリプロットしたものである。これを見ると、輝面色モードの得点は $\log(L_t+1)$ に対してほぼ線形に増加しており、その傾きは背景刺激の輝度

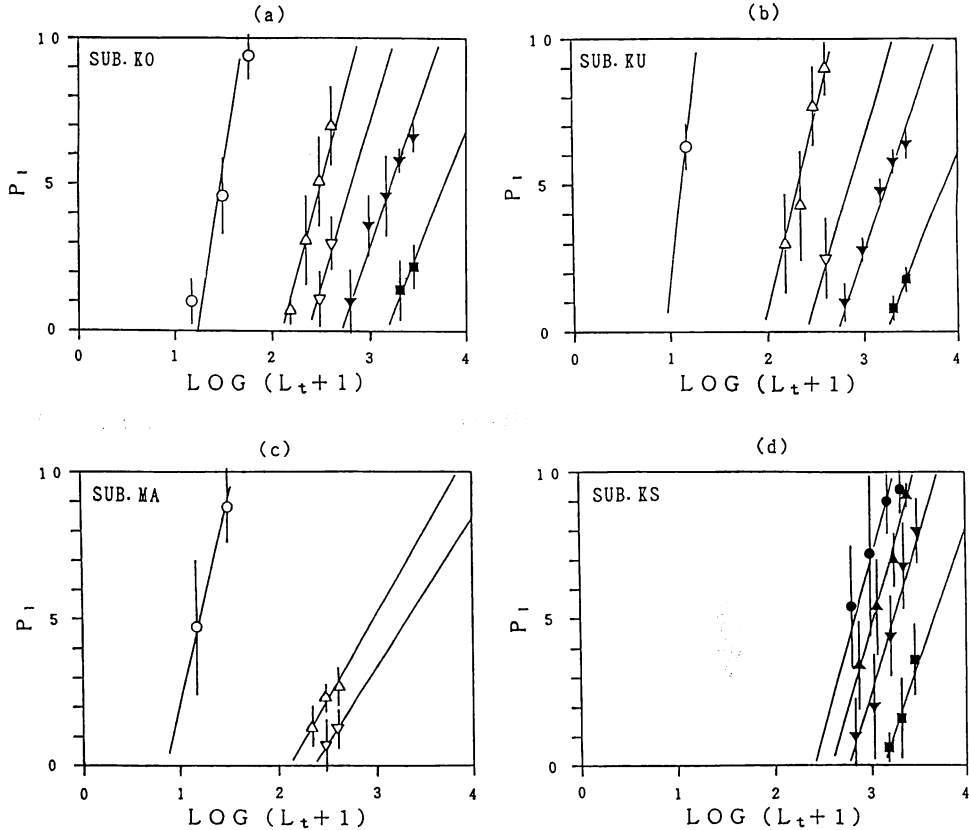


Fig. 3 Point values of luminous color mode, P_i , as plotted for logarithmic luminance of test stimulus. Symbols denote each background condition same as Fig. 2. Bars denote the standard error. Solidlines show Q_t values calculated by Eq. (2). Observers: KO (a), KU (b), MA (c) and KS (d).

L_b によって異なることがわかる。そこで、次のようなテスト刺激の非線形出力関数 O_t を考える。

$$O_t = k(L_b) \cdot \log(L_t + 1) \quad (1)$$

この式は、視覚系が光入力信号を非線形に変換しているということ^{4,5)}からも推測されるものである。 $k(L_b)$ は背景刺激の輝度 L_b の関数である。この O_t が輝面色モードの得点を決定していると考え。実験結果 P_i は 0 から 10 の得点であるため、 O_t を $0 \leq Q_t \leq 10$ において $P_i = Q_t$ となるような関数 Q_t に正規化する。

$$Q_t = k^*(L_b) \cdot \log(L_t + 1) - Q_0 \quad (2)$$

Q_t は、 $0 \leq Q_t \leq 10$ においては輝面色モードの得点 P_i にそのまま対応し、 $Q_t \leq 0$ なら $P_i = 0$ 、 $Q_t \geq 10$ なら $P_i = 10$ と考えるのである。 $k^*(L_b)$ は $k(L_b)$ の定数倍である。 L_t が 0 のとき、 O_t は L_b の値によらず 0 となることから、 Q_t も L_t が 0 のときは L_b の値によらない一定値となることが要請される。その一定値が被験者でただ一つ決まる正規化定数 $-Q_0$ である。Fig. 3 の実線は、

式(2)が実験結果と最も合うような全曲線共通の Q_0 と、それぞれの曲線に対する $k^*(L_b)$ を求めて得られた Q_t の計算値をプロットしたものである。被験者 KO の背景刺激なし(O)のときを除いて、シンボルと実線はよく合っている。いま、

$$Q_t^* = Q_t + Q_0 \quad (3)$$

を考えれば、すべての被験者において、 $L_t = 0$ のとき $Q_t^* = 0$ 、 $Q_t^* \leq Q_0$ のときは完全に表面色モード、 $Q_t^* \geq Q_0 + 10$ のときは完全に輝面色モードと表わすことができる。このようにして、ある背景刺激が与えられた場合のテスト刺激の見えるは、テスト刺激の輝度 L_t の対数関数として説明できる。

次に、背景刺激の輝度の関数 $k^*(L_b)$ を決定する。 $k^*(L_b)$ を輝度の非線形出力の減少関数と考えて、次式を考える。

$$1/k^*(L_b) = a \cdot \log(L_b + b) \quad (4)$$

Fig. 4 のシンボルは、Fig.3 から得られた $1/k^*(L_b)$

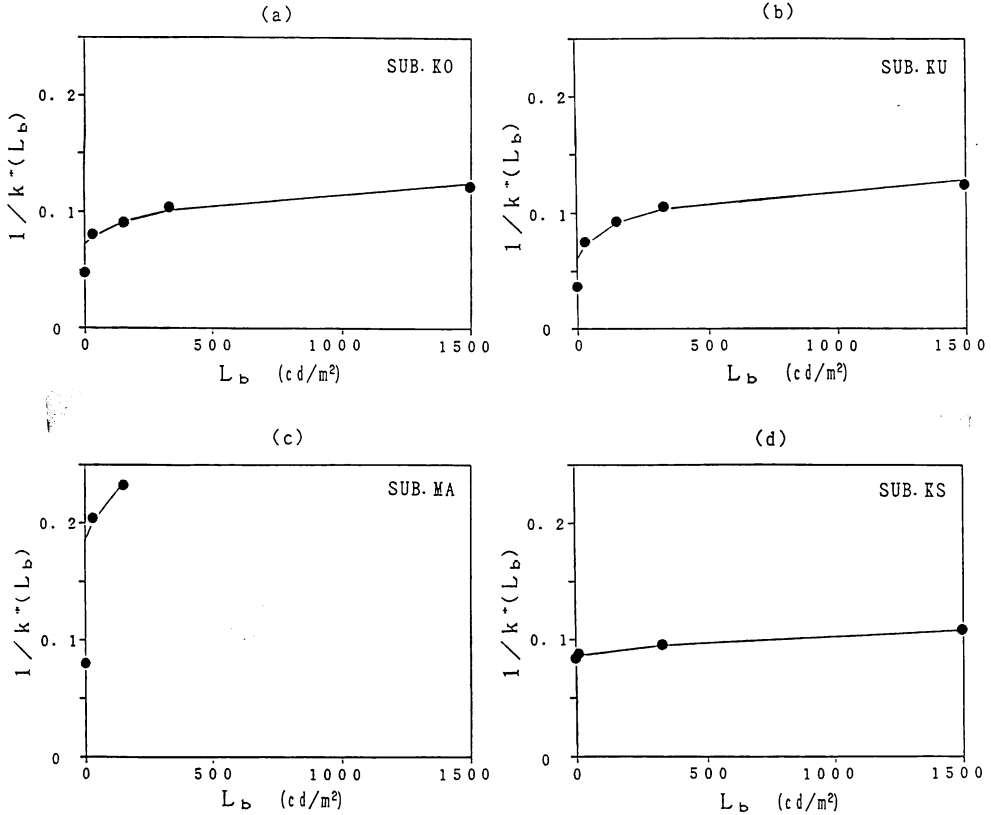


Fig. 4 Plots of $1/k^*(L_b)$ values. Solid curves are theoretical. Observers: KO (a), KU (b), MA (c) and KS (d).

を、横軸を L_b 、縦軸を $1/k^*(L_b)$ としてプロットしたものである。ここで実線は、式(4)の a 、 b を最も結果に合うように求めて得られた計算値を示す。これを見ると、被験者 KS 以外は L_b が0のときを除いて実験値と計算値がよく合っていることがわかる。このことから、式(4)は $L_b > 0$ の範囲において適用できると考えられる。

$L_b = 0$ のとき、式(4)が結果と合わない理由として、背景刺激がない場合のテスト刺激の見えは、テスト刺激だけで決定されるためにテスト刺激表面の不均一性などが大きく影響すること、および L_b の対数関数では $L_b = 0$ 付近の特性が表わしていないことなどが考えられる。したがって、今回は $L_b > 0$ の範囲についてのみを考慮することにする。式(4)を式(2)に代入すれば、

$$Q_t = \frac{\log(L_t + 1)}{a \cdot \log(L_b + b)} - Q_0 \quad (5)$$

ただし、 $L_b > 0$

が得られる。したがって、式(5)が今回用いた白黒刺激の見えのモードを決定する状態方程式である。 Q_t は、

Table 1 Parameters in Eq. (5) optimized for respective 4 subjects.

Subject	a	b	Q_0
KO	0.0390	70	26.0
KU	0.0405	30	25.9
MA	0.1000	70	10.0
KS	0.0330	400	28.7

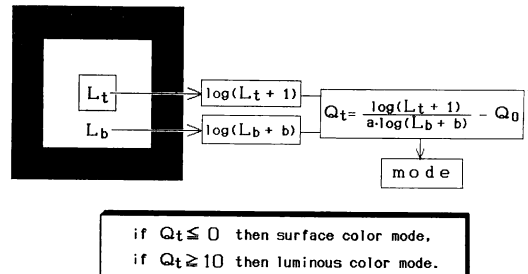


Fig. 5 A model for determining the mode of appearance.

$Q_t \leq 0$ なら完全に表面色モード, $Q_t \geq 10$ なら完全に輝面色モード, $0 \leq Q_t \leq 10$ のときは輝面色モードの得点 P_t にそのまま対応するテスト刺激と背景刺激の輝度 L_t と L_b の関数である. 各被験者の a, b, Q_0 の値は Table 1 に示した.

Fig. 5 は式(5)の概念をモデル図で示したものである. テスト刺激の輝度 L_t は視覚系内で非線形変換され, その出力の効果(倍率)は背景輝度 L_b の非線形出力によってコントロールされ, 最終的なテスト刺激の見えがその後決定されていると考えることができる.

5. 考 察

Heggelund⁶⁾ は, 同時対比効果がある場合の白黒刺激の見えを特定するには, 明るさだけでなく, color strength R と achromatic quality θ の2次元表示が必要で, 見えのモードは θ で決定されると述べている. 今回得られた関数 Q_t は, この θ そのものではないが, 何らかの関係はあるものと考えられる.

Fig. 6 は, 被験者 KO の a, b, Q_0 の値を式(5)に代入し, $Q_t=0, Q_t=10$ の曲線で見えのモードの領域を分割した様子を, 横軸を背景刺激の輝度 L_b , 縦軸をテスト刺激の輝度 L_t にして示したものである. Heggelund⁷⁾ は今回と同様な刺激を観察した結果, テスト刺激の見えは背景強度がテスト刺激よりも小さいとき ($L_b < L_t$) は輝面色モード, そうでないとき ($L_b > L_t$) は表面色モードになると報告している. しかし, 背景よりも明るければ輝いて見えるというのは, 日常的にもあまりありえそうにない.

一方 Ullman⁸⁾ は, 白紙で構成されたモンドリアン刺激の中に本物の光源を埋め込み, それを間違えなく光源として検出するには, その輝度を周囲の平均輝度の35倍以上にする必要があったと報告している. 単純な刺激

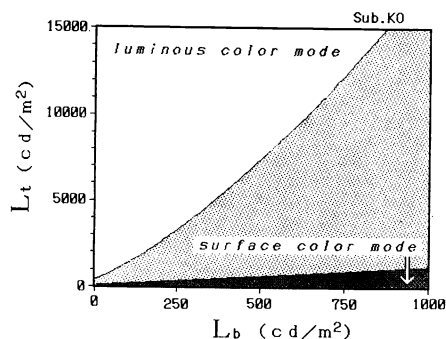


Fig. 6 Mode of appearance stated as a function of L_t and L_b for subject KO.

を用いたわれわれの実験においても, テスト刺激が完全に輝面色モードに見えるためには, テスト刺激と背景刺激で15倍以上の輝度コントラストが必要であること (Fig. 5 参照) が確かめられた. しかし, 彼はまた, 一様な照明下の刺激における光源の検出特性は, 周囲の平均輝度とのコントラストで決定されると述べているが, われわれの結果は, 輝面色モードの見えは単純にコントラストだけでは一意的に決まらないことを示している.

彼らの結果は周囲の平均輝度が 10 ft-L (34.26 cd/m^2) 以下の場合であること, 今回のモデルでは L_b が低い範囲での見えのモードの変化が説明できなかったことなどから, L_b が低い範囲での見えのモードの変化は式(5)とは別のメカニズムで説明されるのかもしれない.

見えのモードがコントラストで決まらなるとすれば, 次のような事態が生じると考えられる. たとえば, 今回の刺激で L_b が $1000 \text{ (cd/m}^2)$, L_t が $15000 \text{ (cd/m}^2)$ の場合, Fig. 5 から被験者 KO にとってテスト刺激は完全に輝面色モードには見えない. しかし, 透過率25%のNDを通して同じ刺激を見ると, L_b は $250 \text{ (cd/m}^2)$, L_t は $3750 \text{ (cd/m}^2)$ となるので, テスト刺激は完全に輝面色モードの見えを呈するであろう. このような見えのモードに対する輝度の非線形性が有彩色においても存在するならば, カラーCRTで表示した色を輝度をそのまま反射率に換算してカラープリンターに印刷しても, CRT画面と印刷物面の輝度レベルが異なると望みの色が得られないという事態も生じるであろう. 見えのモードが異なると, 同じ色光でも色の見えが大きく異なるからである²⁾. このように, 見えのモード状態の定式化は, 色再現などの応用面においても重要なことであると考えられる.

6. ま と め

本研究では, 背景輝度とテスト刺激の輝度を変えたときの白色色票の見えのモードを, モード得点法によって測定した. その結果, テスト刺激の輝度が増加するにつれて, テスト刺激の見えが表面色モードから輝面色モードに徐々に移行していくことがわかった. また, そのテスト刺激の輝度によるモード変化の効果は, 背景刺激の輝度によって異なり, 背景輝度が高くなるにつれてテスト刺激の輝度を高くしないと輝面色モードの見え方に移行していかないことがわかった. これらの結果は, 次のような見えのモード状態方程式を考えることによって説明できる.

$$Q_i = \frac{\log(L_i + 1)}{a \cdot \log(L_b + b)} - Q_0$$

ただし, $L_b > 0$

Q_i は, $Q_i \leq 0$ なら完全に表面色モード, $Q_i \geq 10$ なら完全に輝面色モード, $0 \leq Q_i \leq 10$ においては輝面色モードの得点 P_i にそのまま対応するテスト刺激の輝度 L_i と背景刺激の輝度 L_b の関数である. このような見えのモードの定式化は, 色の見えを定量的に扱うためにも重要なことであると考えられる. 見えのモード状態方程式をさらに一般化するには, 色の違い¹⁾, 刺激の形状⁹⁾, 時間的特性¹⁰⁾などさまざまな条件を考慮していかなければならないだろう. 今後は, 今回のような単純な刺激から得られた結果を, 視覚のメカニズムを踏まえながら, さらに拡張していくことが必要であると思われる.

文 献

- 1) 岡嶋克典, 阿山みよし, 内川恵二, 池田光男: “光源色モードと表面モードにおける明るさ効率の比較”, 光学, **17** (1988) 582-592.
- 2) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: “Influence of achromatic surround on categorical perception of isolated surface colors,” *Vision Res.*, **29** (1989) 881-890.
- 3) K. Fuld and T. A. Otto: “Colors of monochromatic lights that vary in contrast-induced brightness,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 76-83.
- 4) Y. Nakano, M. Ikeda and P. K. Kaiser: “Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models,” *Vision Res.*, **28** (1988) 799-810.
- 5) Y. Nayatani, K. Hashimoto, K. Takahama and H. Sobagaki: “Whiteness-blackness and brightness response in a nonlinear color-appearance model,” *Color Res. Appl.*, **12** (1987) 121-127.
- 6) P. Heggelund: “Achromatic color vision-II: Measurement of simultaneous achromatic contrast within a bidimensional system,” *Vision Res.*, **14** (1974) 1081-1088.
- 7) P. Heggelund: “Achromatic color vision—I: Perceptive variables of achromatic colors,” *Vision Res.*, **14** (1974) 1071-1079.
- 8) S. Ullman: “On visual detection of light sources,” *Biol. Cybern.*, **21** (1976) 205-212.
- 9) K. T. Blackwell and G. Buchsbaum: “The effect of spatial and chromatic parameters on chromatic induction,” *Color Res. Appl.*, **13** (1988) 166-173.
- 10) R. L. De Valois, M. A. Webster and K. K. De Valois: “Temporal properties of brightness and color induction,” *Vision Res.*, **26** (1986) 887-897.