

研究

表面色モードと光源色モードにおける対応色の関係

岡嶋 克典*・池田 光男**

* 防衛大学校応用物理学教室 〒239 横須賀市走水 1-10-20

** 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

(1990年9月25日受付, 1991年3月14日受理)

Relation of Corresponding Color in a Surface Color Mode and a Luminous Color Mode

Katsunori OKAJIMA* and Mitsuo IKEDA**

* Department of Applied Physics, National Defense Academy,
1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka 239** Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School,
4259, Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 227

(Received September 25, 1990; Accepted March 14, 1991)

The color appearances of lights seen in a surface color mode and in a luminous color mode are quite different even when the photometric values are not varied. This fact will give rise to a lot of problems for color-reproduction and developing colorimeter system be based on human perception. In this paper, we measured photometric values of corresponding color in a surface color mode and a luminous color mode by using color-matching method. Surface colors in the present experiment were made up with white surrounding on CRT display. The result shows that surface colors match luminous colors which have higher saturation and lower intensity. From these results, it is suggested that outputs of color-channels at a surface color mode should be amplified and the brightness is reduced by the white surrounding.

1. はじめに

われわれの知覚する色には、大きく分けて表面色と光源色がある。一般に表面色は反射物体の色、光源色は発光体の色として、それぞれ性質が異なる色として取り扱われている。例えば、表面色を表すマンセル表色系には反射率に対応する明度(バリュエー)という属性があるが、これは光源色には存在し得ない。したがって、表面色は

それだけで閉じた色空間を形成していると考えられるが、XYZ表色系などの測光値によって光源色と対応させることはできる。しかし、XYZ表色系は色の見えに関しては何ら規定していないので、測光値によって表面色と光源色の関係を明確に記述することはできない。測光値が同じでも、表面色と光源色では色の見えが異なるからである^{1,2)}。表面色と光源色を統一して取り扱うためには、実際の知覚に基づく表面色と光源色の対応関係を定量化しておく必要がある。近年、CRTによるカラーグラフィック画面とカラープリンターによる印刷物による色再現に関する問題が議論されているが、これには表面色と光源色の非対応性の問題も大きく関与していることが考えられる。したがって、色表示システムや実際の色知覚に忠実な測色システムの構築のためにも、表面色と光源色という異なるモード間における色の見えの

* 研究場所: 東京工業大学大学院総合理工学研究科
Address on research: Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School

** 現在: 京都市工学部建築学教室 〒606 京都市左京区吉田本町
Present address: Department of Architecture, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606

対応化は必要不可欠である。

Uchikawa¹⁾らは、暗黒に単独で呈示した色票は光源色の見えを呈し、表面色特有の茶色や黒色の応答が消失することをカテゴリカル・カラーリングによって明らかにしている。この結果は、視覚系における表面色と光源色の知覚特性が異なることを示唆しており、色知覚メカニズムを考える上でも興味深い。また、測光値が同一であっても表面色と光源色では明るさ効率 B/L の値は異なり、表面色の B/L 値は光源色の B/L 値よりも大きいことが明らかにされている²⁾。その時、周辺光がない光源色モードの色票は白っぽく淡い色を呈し、周辺光がある表面色モードの色票は色みが鮮やかになり黒が入るといふ現象も同時に報告されている。ところでこれらの実験では、同一の色票を周辺光の有無だけで表面色モードと光源色モードにしている。したがって、見えのモード間の明るさや色知覚特性の違いが、刺激の分光特性や材質の差によるものではなく、知覚する側に原因があることは明らかである。また、見えのモードも表面色か光源色かの二値ではなく、周辺光の輝度によって連続的に変化することも明らかにされている³⁾。

以上のことから、測光値が同じ光でも呈示モードによって色の知覚が異なることがわかってきている。そこで本研究では、白色周辺光によって表面色モードにしたテスト色光を、光源色モードの色光とカラーマッチングし、光源色に対応する表面色の測光値を測定した。この結果から、光源色モードの色光が表面色モードになった時の色見えの変化を求めることができる。

2. 方 法

2.1 装 置

実験装置は、2光路の自然視光学系とカラー CRT システムで構成した。装置全体の概略図を Fig. 1 に示す。キセノンランプ (Xe) から出た二つの光は、それぞ

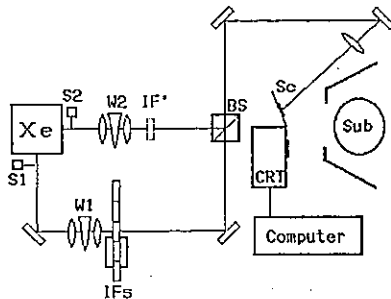


Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus.
See text for details.

れ電磁シャッター (S1, S2), 中性濃度ウェッジ (W1, W2) を通る。W1 を出た光は、リニアモーターで動くレール上に設置された干渉フィルター列 (IFs) 中の選択された1枚を通過する。W2 側は 460 nm と 640 nm の混色刺激条件の場合のみ 460 nm の干渉フィルター (IF') を設置したが、他の条件では W1 からの単色光の彩度を落とすために混色させる白色光を通した。その後、ビームスプリッター (BS) で混色された光を被験者 (Sub) の右正面にあるグレースケール N9.5 のスクリーン (Sc) 上に投影した。一方、被験者の左正面には CRT ディスプレイが置かれており、コンピュータと RGB 各8ビットの色分解能を持つカラーボードを経由して接続されている。被験者は、三つのボリュームが付いた応答ボックスによって、CRT の RGB 発光体の強度を調整することができる。2台のウェッジやリニアモーター、電磁シャッターおよび CRT の呈示設定は、すべてコンピュータで自動制御した。

2.2 刺 激

本実験では、参照色光 (視角 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ の正方形) に 470 nm, 510 nm, 560 nm, 580 nm, 600 nm, 640 nm の各単色光と、470 nm, 490 nm, 510 nm, 560 nm, 580 nm, 640 nm の各単色光に白色を混色した光、および 460 nm と 640 nm を混色した色光の計 13 色を採用した。今回、単色光を得るために干渉フィルターを用いたので、特に緑の単色光 (510 nm) は色度図上でスペクトル軌跡内側に位置している。各被験者で等明るさ参照色光を設定するために行った明るさマッチングでは、テスト色光と同じサイズで輝度が $9.1 \text{ (cd/m}^2\text{)}$, xy 色度が (0.3369, 0.3386) の白色参照刺激を CRT 上に呈示した。この周辺光には、外枠が視角で $1.7^\circ \times 1.7^\circ$, 輝度が $63.5 \text{ (cd/m}^2\text{)}$, xy 色度が (0.3400, 0.3526) の白色光を使用した。光源色や表面色のモードにもいろいろなレベルが存在する^{2,3)}が、今回は周辺刺激がない場合を光源色、一定の白色周辺光に囲まれている色光を表面色として扱うことにする。

2.3 手 順

本実験に先がけて、全参照色光の明るさを各被験者で合わせるための明るさマッチングを行った。ここでは、白色参照光とテストする色光を互いに影響しないように離れた位置に呈示⁴⁾し、被験者は色光の強度を調整して明るさを合せた。白色光が混色されている色光については、白色光の強度だけを変えて明るさを調節したため、被験者によって色度点が異なっている。これを各色光について計6回行い、その平均の色光を以後の本実験の参

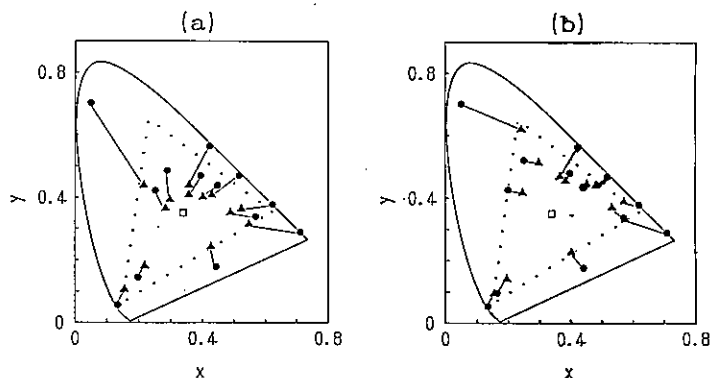


Fig. 2 Points of corresponding colors between surface color mode and luminous color mode in the CIE-1931 chromaticity diagram. Filled circles, reference stimuli as luminous colors; filled triangles, test stimuli as surface colors; open square, surrounding stimulus of test stimuli. Corresponding colors connected by solid lines, respectively. Observers: HU (a) and TM (b).

照色光として使用した。また、予備実験において、白色周辺光で囲まれている CRT 上のテスト色光で問題なくカラーマッチングが行えること、およびマッチングした時に表面色の見えを呈していることを確認した。

本実験では、光学系による等明さ参照色光に、白色周辺光に囲まれた CRT ディスプレイ上の色光をカラーマッチングすることを行った。両色光は、互いに影響がないように離れた位置に呈示した。その時、周辺光がない参照色光は光源色の見えを呈し、白色周辺光があるテスト色光は表面色の見えを呈していた。被験者には、質感や黒味の違いを無視して参照色光に CRT 上の色光をカラーマッチングするように指示した。参照色光はランダムな順序で呈示し、刺激呈示中以外は被験者に光が見えないように電磁シャッターと画面の表示を制御した。被験者がマッチングを完了するまで刺激は呈示されたので、刺激呈示時間は一定ではなかったが、通常数十秒であった。

2.4 被験者

被験者は、HU (男, 27 歳) と TM (男, 24 歳) の 2 名で、共に色覚正常な心理物理実験の経験者である。

3. 結 果

Fig. 2 は、2 人のカラーマッチングの結果を xy 色度座標上に示したものである。シンボル●印は参照色光、シンボル▲はそれとカラーマッチングした色光を示し、対応する両色光のシンボルは実線で結んでいる。また、シンボル□はマッチング刺激の白色周辺光を示している。2 人の結果は共に、光源色の参照色光(●)に色度図内部の表面色であるテスト色光(▲)が等色しているこ

とを示している。このことから、表面色と光源色において対応する色光は異なり、表面色は測光値が同じ光源色よりも色度図上で彩度が高い色として知覚されることがわかる。Fig. 2 内の点線の三角形は、CRT の RGB 各発光体の xy 色度点を結んだものであるが、テスト色光はこの三角形を越えた領域の光源色と等色しており、単色光と等色する場合もあることを示している。以上のことは、表面色と光源色の色の見えを単純に色度図上で比較できないことを示しており、表面色は測光色度が同じ光源色よりも彩度が高く知覚されることを示唆している。

次に、等色時における各色光の輝度を Fig. 3 に示す。左の数値は参照色光の xy 色度値で、黒塗りの棒が参照色光の輝度を、白抜き棒が対応するテスト色光の輝度の値を示している。これを見ると、参照色光に対応するテスト色光の輝度は、参照色光の輝度に比べて非常に高いことがわかる。すなわち、表面色に対応する光源色にマッチングさせるためには、光源色よりも高い輝度の表面色が必要であることを示唆している。以上の結果から、表面色は色度図上で高彩度・低輝度の光源色とカラーマッチングすることが明らかとなった。

4. 考 察

本実験の結果、白色周辺光を伴う表面色が、色度図上で彩度が高く低輝度の光源色とカラーマッチングすることが明らかとなった。このことは、表示機器の色再現特性が測光値だけでは決定されず、周辺表示光や照明条件などによって影響されることを意味している。表面色が低輝度の光源色と対応することは、表面色の明るさが

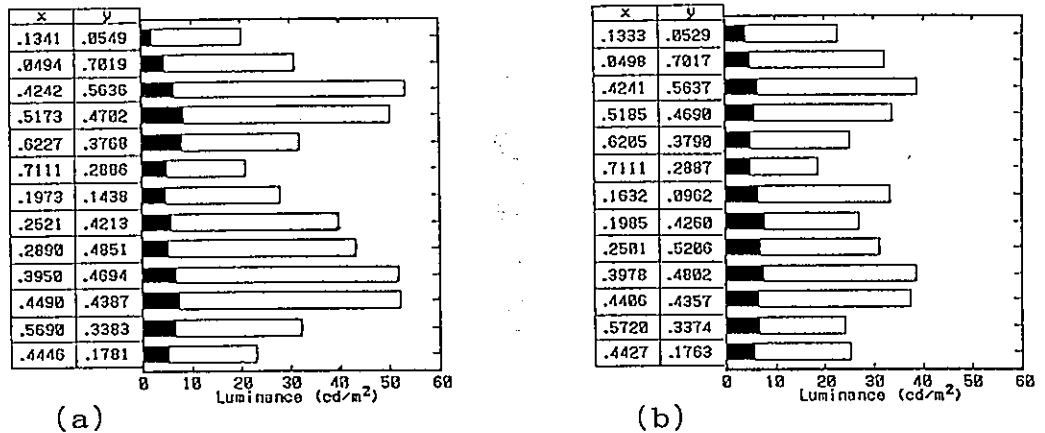


Fig. 3 Luminance values of corresponding colors between two modes. Left values, chromaticity coordinates of test stimuli; Filled Bars, luminances of reference stimuli; open bars, luminances of test stimuli, respectively. Observers: HU (a) and TM (b).

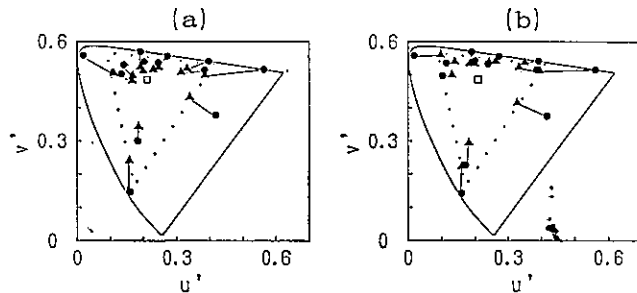


Fig. 4 The results of Fig. 2 replotted in CIE-1976 $u'v'$ chromaticity diagram. Symbols denote each stimuli same as Fig. 2. Observers: HU (a) and TM (b).

光源色の時に比べて減少していることを示唆しており、これは周辺光から誘導された黒成分によって明るさが抑制されたためと考えられる⁵⁾。また、各色の色度変化を比較するために、Fig. 2 を $u'v'$ UCS 色度図上にリプロットしたのが Fig. 4 である。これを見ると、すべてのシンボルは等明るさであるにもかかわらず、対応色光間の $u'v'$ 平面上の距離（色度差）は一定ではなく、色によって大きく異なっていることがわかる。特に参照色光の色度が高い青・緑・赤・紫で、対応色間の色度差が大きい。このことは、光源色が表面色になった時の色度の変化が、高彩度の光源色ほど大きいことを示唆している。以上の現象を説明するために、視覚系における表面色と光源色の色応答特性の違いという観点から考えていくことにする。

Fig. 4 から、表面色の彩度は光源色の時に比べて増加しているように見えるが、同時に輝度も変化しているので色度変化だけから実際の見えの変化を決定することはできない。そこで視覚系の応答レベルで調べるために、

色光の測光値を次式⁶⁾を使って RGB 錐体出力値に変換する。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0711 & 0.9494 & -0.0156 \\ -0.4462 & 1.3173 & 0.0979 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9188 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

この変換で得られた R, G, B は、CIE 標準白色光源 D_{65} の場合にその輝度を L とすると $L=R=G=B$ になるように正規化された値となる。さらに、錐体の非線形性^{6,7)}を考慮するために、次のような対数変換を施す。

$$\left. \begin{aligned} R^* &= \log(R+1) \\ G^* &= \log(G+1) \\ B^* &= \log(B+1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

対数式の中で1を加えているのは、例えば $R=0$ の時に $R^*=0$ にするためである。

最近、ある色に眼が順応した状態での色の見えを予測する色覚モデル^{6,8)}がいくつか提案されているが、本実験では周辺白色光をテスト色光と同時に呈示し、被験者は参照色光と一緒に両眼自然視で観察している。した

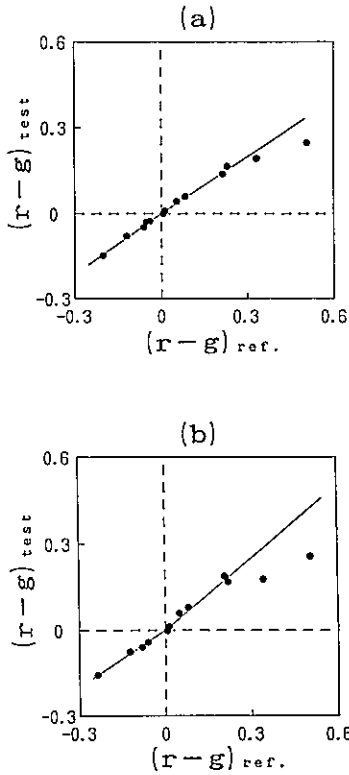


Fig. 5 $(r-g)$ functions of corresponding colors calculated by Eqs. (1)-(3). Solid lines were drawn to fit the data. (See text in detail). Observers: HU (a) and TM (b).

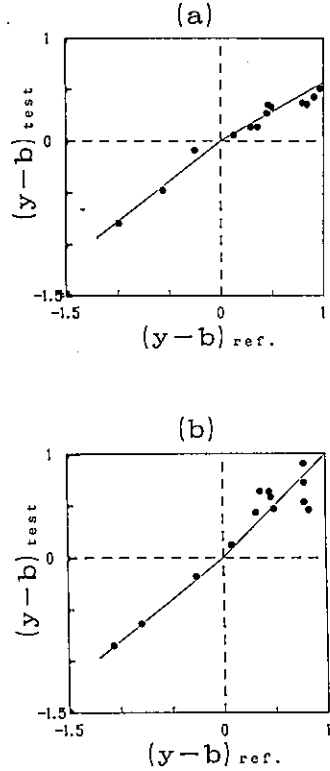


Fig. 6 $(y-b)$ functions of corresponding colors calculated by Eqs. (1)-(3). Solid lines were drawn to fit the data. (See text in detail). Observers: HU (a) and TM (b).

がって、白色周辺光に錐体が順応したためにテスト色光だけの見えが変化したとは考えにくい。そこで今回は、錐体レベルではなく、より高次の色チャンネル出力レベルにおける対応色の関係を調べることにする。(2)式の錐体出力は、拮抗性を有する反対色メカニズムに入力される。そこで、赤緑反対色出力を表す関数を $(r-g)$ 、黄青反対色出力の関数を $(y-b)$ として、

$$\left. \begin{aligned} (r-g) &= R^* - G^* \\ (y-b) &= L^* - B^* \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 $L^* = \log(L+1)$

を考える。この $(r-g)$ および $(y-b)$ 関数は、 D_{65} 光源刺激の場合に共にゼロになることから、ここでは D_{65} 白色をユニークホワイトと仮定する。横軸を参照色光、縦軸を対応するテスト色光の各関数値でプロットしたのが Fig. 5 と Fig. 6 である。Fig. 5 が $(r-g)$ 、Fig. 6 が $(y-b)$ を表し、それぞれ(a), (b)は被験者が異なる。Fig. 5, Fig. 6 の直線は、各象限でシンボルに良く合うように引いた近似直線である。Fig. 5 のグラフの第1象限は、 $(r-g)$ が正の値をとるので赤成分が存在する

領域、第3象限は負の値をとるので緑成分が存在する領域である。この図を見ると、 $(r-g)$ の値が大きい場合を除いて結果はほぼ2直線で近似することができ、対応色の色チャンネル出力の間には比例的関係があることが示唆される。また、Fig. 6 の $(y-b)$ の結果も2直線上にシンボルが集まる傾向が見られるが、第1象限すなわち黄領域ではばらつきが大きい。このばらつきは、光源色の黄色や橙色は表面色モードになると茶色になる色とならない色がある¹⁾ことから、色による特性の差が大きいためと考えられる。Fig. 5 と Fig. 6 において、近似直線の傾きがそれぞれ異なるのは、各色チャンネル間の特性の違いを表しており、赤緑チャンネルの変化が大きいことを示している。

Fig. 5, Fig. 6 において、光源色と表面色が同じ光でマッチングしたとすれば、近似直線の傾きは1になるが、実際の直線の傾きはすべて1より小さい。このことは、表面色の見かけの色チャンネル出力は光源色の色チャンネル出力より小さいことを意味しているが、両色はカラーマッチングしているので、実際の色チャンネル

出力量は互いに等しくなっているはずである。したがって、表面色の色チャンネル出力量が周辺白色光によって等倍率で増大し、光源色と等しくなっていると考えることができる。この場合、増大率は近似直線の傾きの逆数になる。各チャンネル内で増大率が等しいことと、全てのテスト色光に対して同じ白色周辺光を用いたことを考慮すると、色出力の増大率はコントラストではなく、周辺光の輝度によって一意的に決定されることが示唆される。この増大率と周辺光の関係は、周辺光を変えて増大率の変化を調べる実験を行い、さらに詳しく検討する必要がある。

白色周辺光による色チャンネル出力の増加現象は、測光値が同じ表面色と光源色では、表面色の方が光源色よりも明るさ効率が大きい²⁾ことから充分考えられる。

Kinnear⁹⁾は、周辺光はカラーネーミングには影響するが、比視感度関数には影響しないことを指摘している。これは、周辺光の効果が黒みも含めて色チャンネルにのみ作用し、輝度チャンネルには作用しないことを示唆している。しかし、周辺光がある表面色モードの色光には黒成分が存在することから、白成分は減少していることが推測される⁵⁾。黒成分は表面色の色の見えに直接影響しており、今回無視した黒みが、色の見えに対してどう影響するのかを定量的に調べることも必要であろう。

5. 結 論

本研究では、表面色モードの色光を光源色モードの色光とカラーマッチングする実験を行い、表面色と光源色の対応測光値の測定を行った。その結果、表面色モードの色光は、それよりも色度図上で彩度が高く輝度が低い

光源色モードの色光とカラーマッチングすることが明らかになった。得られた対応色の関係から、錐体非線形出力からの色チャンネル出力は周辺光によって増幅され、逆に明るさは抑制されていることが示唆された。あらゆる呈示条件における光源色と表面色の関係を定式化し、統一して取り扱うためには、両モードの色の見えに関する定量的な研究が、今後さらに必要であると考えられる。

文 献

- 1) 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.
- 2) 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色モードにおける明るさ効率の比較", *光学*, 17 (1988) 582-592.
- 3) 岡嶋克典, 池田光男: "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", *光学*, 18 (1989) 558-564.
- 4) 高瀬正典, 岡嶋克典, 内川恵二, 池田光男: "直接比較法における色光の明るさの変化", *光学*, 19 (1990) 176-181.
- 5) 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.
- 6) Y. Nayatani, K. Takahama and H. Sobagaki: "Prediction of color appearance under various adapting conditions," *Color Res. Appl.*, 11 (1986) 62-71.
- 7) Y. Nakano, M. Ikeda and P.K. Kaiser: "Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models," *Vision Res.*, 28 (1988) 799-810.
- 8) R.W.G. Hunt: "A model of colour vision for predicting colour appearance," *Color Res. Appl.*, 7 (1982) 95-112.
- 9) P.K. Kinneer: "The effects of colored surrounds on colour naming and luminosity," *Vision Res.*, 19 (1979) 1381-1387.