

研究速報

等明るさ色光の輝度-彩度関数のモデル

内川 恵二・内川 弘美

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

(1985年8月27日受理)

A Model for Luminance-Saturation Function of Equally Bright Colored-Lights

Keiji UCHIKAWA and Hiromi UCHIKAWA

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

It has been reported in a number of investigations that luminance of equally bright colored-lights decreases as saturation of those colors increases. This brightness-luminance discrepancy is qualitatively accounted for by some color-vision models. But they fail to predict that the relationships between luminance and saturation of equally bright colored-lights depend on dominant wavelengths of those colors. In this paper, we modified equations of brightness, luminance and saturation used in the color-vision models to explain the experimental results shown by Uchikawa *et al.* (1984). The quite good fit between theoretical functions and the experimental data was obtained, which indicates that chromatic contribution to brightness of colored-lights varies depending of their hue, being greatest at about the wavelength where the blue-cone sensitivity is maximum.

1. はじめに

色光は色度が異なると、輝度 (luminance) が等しくても、必ずしも等しい明るさ (brightness) になるとは限らない^{1,2)}。この現象は明るさ-輝度不一致 (brightness-luminance discrepancy) と呼ばれ、測光学上では大きな問題となっている³⁾。この明るさ-輝度不一致の大きさは色光の彩度*1 (saturation) と相関が強い。たとえば、色光と白色光を等輝度にそろえても、色光の彩度が大きいほど白色光より色光のほうが明るく見え、明るさ-輝度不一致の大きさが増大する⁴⁾。

現在のほとんどの色覚モデル⁵⁻⁸⁾では色光の輝度は輝度チャンネル (luminance channel) だけからの出力であり、明るさは輝度チャンネルの出力に色チャンネル

(chromatic channel) の出力が加わった和であるとされている。さらに、色光の彩度は色チャンネルの出力と輝度チャンネルの出力の比で決まるとされている。したがって、色光の明るさ-輝度不一致の大きさは色光の彩度に比例し、それらの色覚モデルは実験結果を定性的にはうまく説明している。

しかし、Uchikawa ら^{2,4,9)}は色光の明るさ、輝度、彩度の関係を定量的に調べ、色光の明るさ-輝度不一致の大きさは彩度が等しい色光でも主波長が異なると必ずしも等しくならぬことを示した。これから、色チャンネルの明るさへの寄与が色光の色相 (hue) により異なることを示唆した。この実験結果は現在までに発表されている色覚モデル⁵⁻⁷⁾では十分に説明できない現象であり、それらの色覚モデルの修正が必要であることを意味している。

本論文では、Uchikawa ら⁴⁾の発表した色光の明るさ-輝度不一致の大きさと彩度の関係を示した実験結果を現在ある色覚モデルを修正して説明することを目的とし

*1 ここでいう彩度とは色光のクロマティック成分 (chromatic component) と白成分 (achromatic component) の相対値に関係した心理量である。刺激純度あるいは輝度純度は白色光で0、単色光で1となるが、彩度は白色光では0だが、単色光でも1になるとは限らない。

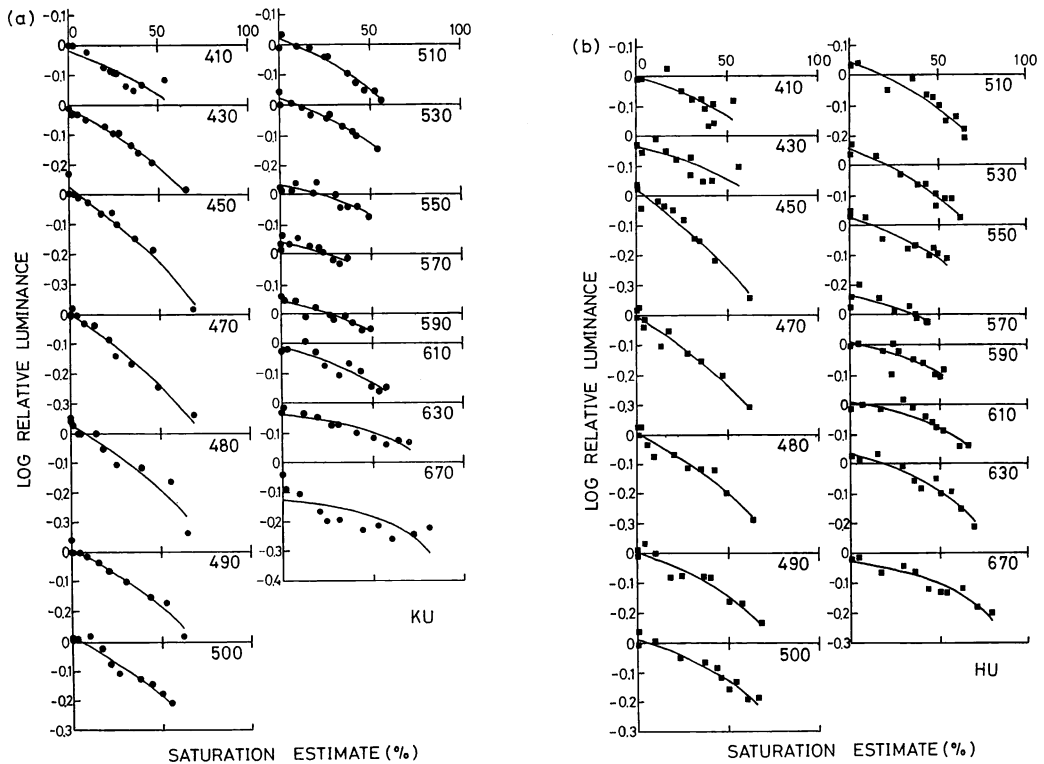


Fig. 1 Log relative luminance as functions of saturation estimates for equally bright colored lights. The dominant wavelength is shown in each section. The data points show the experimental results by Uchikawa *et al.* (1984). The solid curves represent theoretical functions derived by the color-vision model. (a): subject KU, (b): subject HU.

た。

2. 等明るさ色光の輝度と彩度との関係 —実験結果

Fig. 1(a), (b)に等明るさ色光の彩度と相対輝度との関係を測定した Uchikawa *ら*⁴⁾の実験結果をそれぞれ黒丸, 黒四角印でプロットされたデータ点で示す。**Fig. 1(a)**は被験者 KU, **(b)**は被験者 HU の結果を表わす。刺激には 410~670 nm の単色光と白色光の混色光を用い, 刺激純度は 0 から 1 まで 0.1 間隔で 11 個用いている。主波長は各図の右上に示されている。図の横軸になっている色光の彩度は, 刺激のクロマティックネス (chromaticness) の割合をマグニチュード評価した値*2 をパーセントで示したものである。縦軸には刺激の相対

輝度が対数値 $\log(1/L)$ で示されている。縦軸が 0, すなわち $L=1$ の位置は実験に用いたすべての白色刺激光 (刺激純度=0) の輝度の平均値とした。図中, 各主波長での白色刺激光 (彩度評価=0% の点) の $\log(1/L)$ は測定誤差のため必ずしも 0 にならず, それに伴い, 各主波長内の全刺激の $\log(1/L)$ は全体的に縦軸 0 の位置に比べて上下にシフトした形となって現われている。

3. 色光の明るさ, 輝度, 彩度—モデル式

色光の明るさ (B), 輝度 (L), 彩度 (S) をここでは次式で定義する。

$$S = C^n / (A^n + C^n) \quad (1)$$

$$B = (A^n + k_B C^n)^{1/n} \quad (2)$$

$$L = A \quad (3)$$

ここで, A は色光の白成分 (以下 A 成分と呼ぶ), C はクロマティック成分 (以下 C 成分と呼ぶ) を表わす。(1)式は色光の彩度が色光の C 成分と A 成分プラス C 成分の比で表わされることを示している。ただし, A 成

*2 たとえば被験者 KU の主波長 500 nm, 刺激純度 0.7 の刺激のマグニチュード評価値は 38% であった。これはこの刺激では心理量であるクロマティックネス (色味の強さ) とアクロマティックネス (白味の強さ) の比が 38 : 62 になっていることを意味している。

分と C 成分はまず n 乗されてからたし合わされ、比がとられている*3. (2)式は色光の明るさが色光の A 成分と C 成分の n 乗和の n 乗根で表わされることを示している. C 成分の係数 k_B は色光の C 成分の寄与が彩度と明るさで異なっていることを表わす係数である. 本論文はこの係数 k_B を導入することで, 等明るさ色光の輝度と彩度の関数が主波長により異なることをモデルの上から説明しようとするものである. (3)式は色光の輝度が色光の A 成分に等しいことを示している.

次に, 等明るさ色光の輝度と彩度の関係を求めるために, (1), (2), (3)式を変形すると,

$$\log(B/L) = (1/n) \log \{k_B \cdot S / (1-S) + 1\} \quad (4)$$

となる. 刺激は等明るさ色光であるから, B はすべての刺激で等しい. そこで $B=1$ とする. また, $\log(1/L)$ の S によらない縦軸方向のシフト量を表わす定数 k_C を右辺に付けると,

$$\log(1/L) = (1/n) \log \{k_B \cdot S / (1-S) + 1\} + k_C \quad (5)$$

となる. この(5)式の関数を用いて理論値と実験値のフィットを行なう.

本論文では, Fig. 1 に示した実験結果をモデルを用いて説明することが目的であるから, まず(5)式の理論関数が実験結果によくフィットするかどうかをみる. 次に色覚モデルの上でこの関数が示唆する点を考察するために, 明るさ定義の(2)式内の係数 k_B が刺激の主波長のどのような関数になっているかを調べる. パラメータ n は(1), (2)式からわかるように, A 成分と C 成分のべき指数であり, この値は刺激の主波長によらず一定とすべきものである. ここでは $n=2$ とし, k_B と k_C を変化させて, フィットングを行なうことにした*4. フィットングには最小2乗法を用いた.

Fig. 1(a), (b)内の実験データ点とともに示した実線が上述した方法で求めた理論曲線である. (a)では主波長 410, 670 nm で, (b)では主波長 410, 430 nm でやや理論曲線とデータ点とのフィットが悪いが, それ以外の主波長では理論曲線はかなりよく実験結果にフィットしているといえよう.

*3 彩度は $S=C/(A^n+C^n)^{1/n}$ とする定義も一般的に考えられるが, 式(1)のほうが実験データによりよくフィットしたため, ここでは式(1)の形を採用した. したがって, ここでは, 彩度の評価実験の際のクロマティックネスとアクロマティックネスはそれぞれ C^n, A^n に比例するものであると考える.

*4 n を変化させても, それぞれの n の値で, k_B, k_C を変化させると, ほぼ等しい形状の曲線が得られるため, n をある値に固定してもフィットング上さほど困難はない. また, $n=2$ としたのは, 色覚のベクトルモデルとの対応を考えたためである.

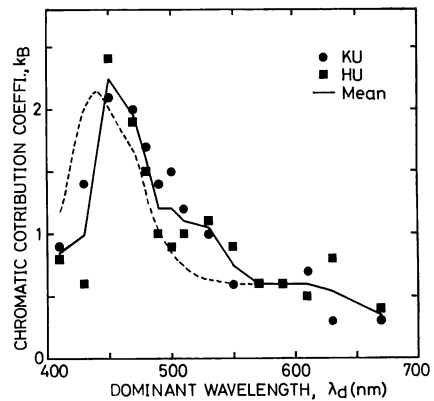


Fig. 2 Chromatic contribution coefficient, k_B as a function of dominant wavelength, λ_d . Subjects; \bullet : KU, \blacksquare : HU. The solid line shows mean results. The dotted curve indicates the Smith-Pokorny blue-cone spectral sensitivity function.

各理論曲線を与える k_B の値は次項で述べるが, k_C の値は $S=0$ のときの $\log(1/L)$ の理論値となっている. k_C の値は被験者 KU (Fig. 1(a)) では $-0.13 \leq k_C \leq 0.04$, 被験者 HU (Fig. 1(b)) では $-0.04 \leq k_C \leq 0.06$ の範囲に入っている.

4. 明るさへのクロマティック成分の寄与

Fig. 2 に Fig. 1(a), (b)に示したおのおのの理論曲線を与えるクロマティック寄与係数 k_B の値を主波長 λ_d の関数として示した. 各シンボルはそれぞれの被験者の結果を表わし, 実線は両者の平均値を示す. Fig. 2 から k_B の値は λ_d が 450 nm で最大となり, それより λ_d が短波長側, 長波長側に離れるにつれて急激に減少することがわかる. $\lambda_d=570$ nm より長波長側では減少はゆるやかになっている. これより, 色光のクロマティック成分の明るさにおよぼす寄与は色光の主波長により異なり, 主波長が 450 nm 付近の青領域で最大となり, 青紫領域あるいは緑領域へと主波長が変化するに伴い, 減少しているといえる. 主波長 570 nm 付近の黄領域から赤領域にかけてクロマティック成分の寄与はほとんど変わらず, 変化があってもごくわずかである.

Fig. 2 中, 破線で示した曲線は Smith-Pokorny の求めた青錐体の分光感度曲線である⁸⁾. 分光感度曲線は実線と合うように正規化し, 上下方向にシフトしてある. 破線と実線を比較するとわかるように, 色光のクロマティック成分の寄与は青錐体の感度と類似している. 色光のクロマティック成分のうち, 青錐体から入力を受ける成分, すなわち $y-b$ 反対色チャンネルの b の成分が他

の成分より明るさへより多く寄与していることが示唆される。

5. おわりに

本論文では、色光のクロマティック成分の明るさへの寄与が色光の主波長に依存し、その依存を示す関数が青錐体の感度関数に類似していることを示したにとどまったが、次のステップとしては、この寄与関数を錐体あるいは反対色チャンネルの応答を用いて定式化し、色覚のモデルをより完全なものにしていくことが考えられる。

最後に、本論文をまとめる上でご助言をいただいた東京工業大学大学院総合理工学研究科の池田光男教授に感謝いたします。

文 献

- 1) D. L. MacAdam: "Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colors," J. Opt. Soc. Am., **40** (1950) 589-595.
- 2) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: "Equating colors for saturation and brightness: the relationship to luminance," J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 1219-1224.
- 3) M. Ikeda, H. Yaguchi and K. Sagawa: "Brightness luminous-efficiency functions for 2° and 10° fields," J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 1660-1665.
- 4) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: "Luminance and saturation of equally bright colors," Color Res. Appl., **9** (1984) 5-14.
- 5) S. L. Guth, R. E. Massof and T. Benzschawel: "Vector model for normal and dichromatic color vision," J. Opt. Soc. Am., **70** (1980) 197-212.
- 6) 矢口博久, 池田光男: "明るさ感覚における反対色チャンネルの非線形的介入", 光学, **9** (1980) 44-51.
- 7) C. R. Ingling, Jr. and B. H. Tsou: "Orthogonal combination of the three visual channels," Vision Res., **17** (1977) 1075-1089.
- 8) R. M. Boynton: *Human Color Vision* (Holt, New York, 1979).
- 9) 内川弘美, 内川恵二, P. K. Kaiser: "色光の luminance, brightness, saturation の関係", 光学, **11** (1982) 187-194.