

研究

明るさ評価のための測光システム

矢口 博久*・池田 光男**

*Division of Physics, National Research Council of Canada,
Ottawa, Ontario, Canada K1A OR 6

**東京工業大学総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1983年8月10日受理)

Photometric System for Brightness

Hirohisa YAGUCHI* and Mitsuo IKEDA**

*Division of Physics, National Research Council of Canada,
Ottawa, Ontario, Canada K1A OR 6

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

The luminance defined by the present CIE photometric system does not always correspond to the brightness that we perceive from a colored light. In the present article a new photometric system for brightness is proposed, which bases on the concept that the brightness of a colored stimulus is affected not only by its luminance but also its chromaticness. The quantitative transformation from cone responses of three types to the perception of brightness is introduced and the estimated value for the brightness is obtained as a function of the luminance and the chromaticity coordinates. The brightness estimated for various color sources are given.

1. はじめに

光源や物体の明るさを表わす心理物理量として輝度が用いられているが、これは実際の明るさ感を忠実に表わしていない。とくに有彩色の光の明るさに対して過小に評価している。近年、カラーCRT、LED、レーザー等の高彩度なカラーディスプレイシステムが広い分野で利用されるようになり、この輝度-明るさの不一致の問題はますます無視できない状況にある。このような現状から、有彩色の明るさを正しく評価するための新しい測光システムの確立が望まれている。本論文では現在の測光システムの問題点を述べ、色覚理論に基づいた新しい測光システムを提案する。

2. 現在の測光システムの問題点

現在用いられている輝度は(1)式で定義されている。

$$L = K_m \int_{\lambda} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで L は輝度、 K_m は最大視感度 (683 lm/W),

$L_{e,\lambda}$ は分光放射輝度、 $V(\lambda)$ は国際照明委員会(CIE)により勧告されている明所視の標準比視感度関数である(本論文で $V(\lambda)$ とだけ記した場合はこのCIE $V(\lambda)$ を用こととする)。輝度-明るさの不一致の原因として次の二つがこの式にある。

(i) $V(\lambda)$ が明るさの比視感度と異なる¹⁾.

(ii) (1)式の波長積分は輝度の加法則を意味するが、明るさの加法則は必ずしも成立しない^{2,3)}.

まず、(i)の問題であるが、これは $V(\lambda)$ の求め方に起因する。 $V(\lambda)$ はおもに交照法のデータをもとにしている。しかし交照法はちらつき感を判断基準としているので、明るさを評価しているとはいえない。これに対し、明るさの比視感度を求めるには直接比較法が用いられる。**Fig. 1** に $V(\lambda)$ (○印) と直接比較法による比視感度関数 $V_b(\lambda)$ (●印) を示す。この $V_b(\lambda)$ は池田らがCIEの比視感度に関する技術委員会のデータを見直し、さらに日本人のデータを加えた37人の被験者の平均値である^{4,5)}。 $V(\lambda)$ は後に実際の交照法のデータとも短波長域で一致しないことがわかり、Judd がこれを修正し

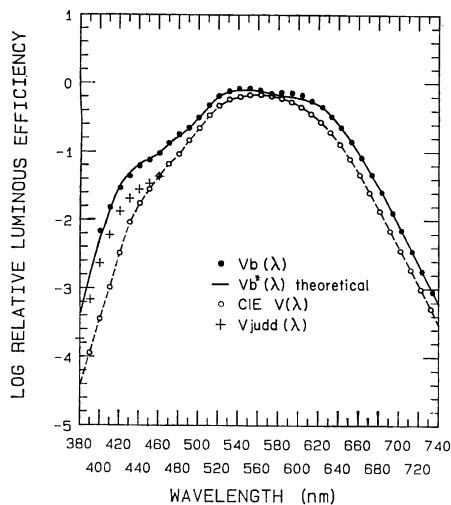


Fig. 1 Comparison of four luminous efficiency functions: ○, CIE $V(\lambda)$; +, CIE $V(\lambda)$ modified by Judd; ●, the mean luminous efficiency function for brightness for 37 observers; solid line, the theoretical luminous efficiency function for brightness.

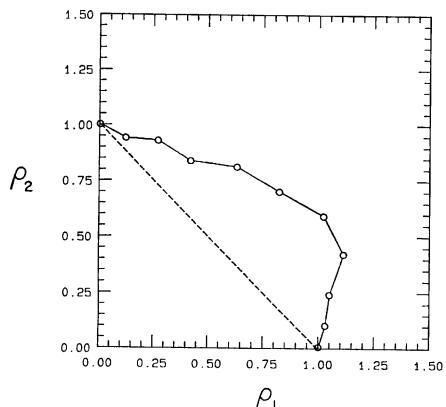


Fig. 2 Relative amount of 500 nm green, ρ_1 , and that of 660 nm red, ρ_2 , required to maintain a constant brightness for various mixtures of red and green. The dashed line of negative unit slope is the requirement for additivity.

た. **Fig. 1** の短波長域の + 印はこの Judd 修正の $V(\lambda)$, $V_{\text{Judd}}(\lambda)$ である^{*1}. $V_b(\lambda)$ を $V(\lambda)$ あるいは $V_{\text{Judd}}(\lambda)$ と比較してみると、赤あるいは青の可視波長域両端つま

*1 Judd 修正 $V(\lambda)$ はその後 Vos によってさらに修正された⁶⁾. 同時に色度座標 (x', y') , 等色関数 $x'(\lambda), y'(\lambda), z'(\lambda)$ も修正された. 本論文ではすべてこの Vos 修正値を Judd 修正として用いる.

り彩度の高い波長域ほど感度が高いことがわかる. たとえば 570 nm の単色光と 633 nm の He-Ne レーザー光が同じ明るさに見えたとすると、前者の輝度は後者のそれの約 1.7 倍ということになる. したがって、少なくとも単色光の明るさを評価する場合は $V(\lambda)$ に代わって $V_b(\lambda)$ を使ったほうがよい. ところが世の中の大部分の光は単色光以外の光、つまり複合放射であり、これの明るさを評価する場合は(ii)の加則法の問題が重要になる.

たとえば 500 nm の緑と 660 nm の赤の単色光を混ぜた場合の明るさについて考えてみよう. まず 500 nm の単色光の明るさをある参照光の明るさと等しくする. 同様に 660 nm の単色光についても同じ参照光の明るさと等しくする. 次に、この二つの単色光を適当な比率で混色し再び同じ参照光と明るさを等しくする. このときの各単色光の光量をおのおの単独で参照光と明るさを等しくした場合の光量との比 ρ_1, ρ_2 で表わす. **Fig. 2** はこの実験結果を示したもので、 ρ_1 と ρ_2 の関係を示している. この曲線を $\rho_1-\rho_2$ 曲線と呼ぶことにする. ここで破線で示した $\rho_1+\rho_2=1$ の直線は加法則の成立を意味する. 実験結果は $\rho_1+\rho_2>1$ の範囲、つまり混色により加法則から予測される値より余分の光量が必要であったことを表わしている. これを明るさ減少型加法則不軌と呼ぶ. この $\rho_1-\rho_2$ 曲線は 2 波長の組合せによって変化し、とくに **Fig. 2** のような赤と緑という反対色同士の組合せのときは強い明るさ減少が見られ、430 nm 付近の短波長端の単色光との混色の場合は $\rho_1+\rho_2<1$ の明るさ増大型加法則不軌も生じる. 以上のことから明らかなように、明るさの加法則が成立しないので、(1)式の波長積分は明るさに関しては使えないことになる.

以上のように、(i), (ii)の問題を輝度-明るさの不一致の原因として述べたが、これを言い換えると(i)は単色光について、(ii)は複合放射についての輝度-明るさの不一致ということになる. しかし、単色光、複合放射と刺激の物理的分光組成が異なっていても、網膜の視物質に吸収されてからはこれらの効果は刺激による生理学的応答だけに依存し、単色光も複合放射も何の差もなくなる. したがって、(i), (ii)の二つの問題は軌を一にしており、同時に説明されるべきものである. 著者はすでに明るさの加法則不軌の実験結果からモデルを導き、これらの問題に一つの解答を与えた. この理論は、明るさには輝度チャンネル応答だけでなく(r-g) 反対色チャンネル応答、(y-b) 反対色チャンネル応答が介入しているという基本概念に基づいている^{7,8)}.

3. 明るさモデル

明るさに限らず視覚系による情報処理は光受容器である錐体の応答から始まる。錐体の分光感度として Smith らのもの⁹⁾と Vos のもの⁶⁾の二つが代表的である。これらはほぼ同じ分光感度を示しているが、Smith らは3種類の錐体（ここでは短波長域にピーク感度をもつものをB錐体、中波長域のものをG錐体、長波長域のものをR錐体と呼ぶ）のうち、G錐体とR錐体だけを輝度チャンネルの入力とし、Vos は錐体の寄与は少ないがこれを含めた3種類すべての錐体を輝度チャンネルの入力としている。このどちらが正しいかについてはまだ結論を得ていない。ここでは Vos の立場をとり、彼の導いた錐体の分光感度 $B_\lambda, G_\lambda, R_\lambda$ を用いた。Fig. 3 にその分光感度曲線を示す。

これらの錐体の応答が輝度チャンネル、(r-g) 反対色チャンネル、(y-b) 反対色チャンネルへの入力となる。ここではこれを線形変換と仮定した。すなわち式で表わすと次式になる。

$$\begin{pmatrix} \bar{a}_\lambda \\ \bar{c}_{1\lambda} \\ \bar{c}_{2\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_\lambda \\ G_\lambda \\ B_\lambda \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで \bar{a}_λ は輝度チャンネルの分光感度、 $\bar{c}_{1\lambda}$ は (r-g) 反対色チャンネルの分光感度、 $\bar{c}_{2\lambda}$ は (y-b) 反対色チャンネルの分光感度である。(2)式の係数行列は次の条件を満足するように決めた。

- (i) $\bar{a}_\lambda = V_{Judd}(\lambda)$ とする。つまり $\bar{a}_\lambda = R_\lambda + G_\lambda + B_\lambda$ 。
- (ii) (r-g) 反対色チャンネルは R錐体と G錐体の差とし、B錐体は関与しないとする。

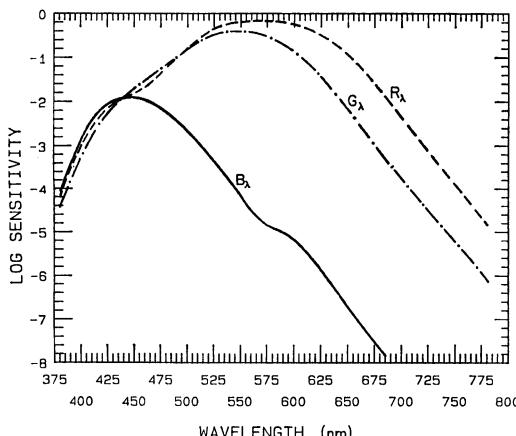


Fig. 3 Spectral sensitivity curves of the three types of cone by Vos.

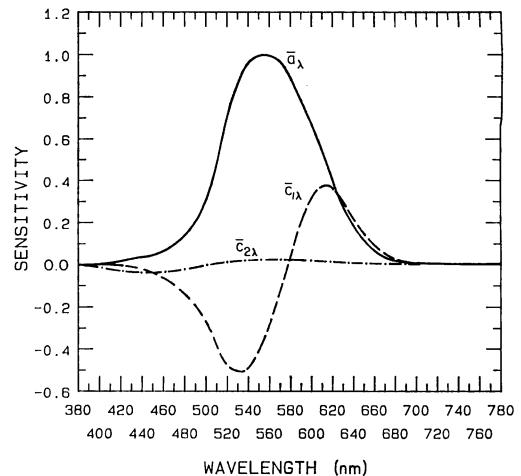


Fig. 4 Spectral sensitivity curves of the luminance channel, \bar{a}_λ , the (r-g) opponent-color channel, $\bar{c}_{1\lambda}$, and the (y-b) opponent-color channel, $\bar{c}_{2\lambda}$.

- (iii) $\lambda=577 \text{ nm}$ をユニーク黄とし、 $\bar{c}_{1,577}=0$ とする。
- (iv) (y-b) 反対色チャンネルは 輝度チャンネルと B錐体の差とする。
- (v) $\lambda=500 \text{ nm}$ をユニーク緑とし、 $\bar{c}_{2,500}=0$ とする。

以上の5条件により、 \bar{a}_λ は決まり、 $\bar{c}_{1\lambda}, \bar{c}_{2\lambda}$ の分光感度曲線の形状は決まる。

次に輝度チャンネル応答、(r-g), (y-b) 両反対色チャンネル応答がどのように明るさに寄与するかという問題になる。Guth らは輝度チャンネル応答と二つの反対色チャンネル応答がベクトル和で結合され明るさになるとされている⁷⁾。このモデルは反対色チャンネル応答を明るさへ導入したという点で反対色同士の色の混色、たとえば赤と緑の混色時の明るさ減少型加法則不軌をうまく説明しうる。しかしこのモデルには二つの問題がある。第一は、ベクトルモデルに基づく $\rho_1 - \rho_2$ 曲線は $\rho_1 = \rho_2$ の直線を長軸あるいは短軸とした橢円曲線となり、Fig. 2 に見られるような $\rho_1 - \rho_2$ 曲線の非対称性を説明できない。第二は、ベクトルモデルでは常に $\rho_1 + \rho_2 \geq 1$ となり明るさ増大型の加法則不軌を説明できない。筆者らはこの二つの問題は反対色チャンネル応答に指數関数で表わされる非線形変換をほどこすことによって解決されることを見いだし、次式で明るさの式を表わした。

$$\left[\int_{\lambda} \frac{S(\lambda)}{B} \bar{a}_\lambda d\lambda \right]^2 + \left[\int_{\lambda} \frac{S(\lambda)}{B} \bar{c}_{1\lambda} d\lambda \right]^{2p}$$

$$+\left[\int_{\lambda} \frac{S(\lambda)}{B} c_{2\lambda} d\lambda\right]^{2q} = 1 \quad (3)$$

ここで、 $S(\lambda)$ は刺激の相対分光分布で、 B はこれに対する相対的な明るさを表わす。指数係数 p, q は明るさの加法性の実験をもとにして $p=0.64, q=0.36$ が得られた。 $p=1.0, q=1.0$ とすれば、Guth のモデルとまったく同じになる。(3)式について、等明るさ、つまり $B=1$ に対する各単色光のエネルギーを計算しその逆数をとれば明るさの比視感度関数が得られる。つまり、

$$\{S(\lambda)\bar{a}_{\lambda}\}^2 + \{S(\lambda)\bar{c}_{1\lambda}\}^{2p} + \{S(\lambda)\bar{c}_{2\lambda}\}^{2q} = 1 \quad (4)$$

を $1/S(\lambda)$ について解いたものが理論的な明るさの比視感度関数 $V_b^*(\lambda)$ となる。そこで(2)式の係数行列を求めるための6番目の条件として、

(vi) (4)式の $1/S(\lambda)$ が平均的明るさ比視感度関数

$V_b(\lambda)$ (Fig. 1 の ●印) に最も近い値をとる。

を加えることにより、明るさへ各チャンネル応答が及ぼす相対量も決まり、最終的に次式を得た。

$$\begin{pmatrix} \bar{a}_{\lambda} \\ \bar{c}_{1\lambda} \\ \bar{c}_{2\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1.496 & -3.388 & 0 \\ 0.024 & 0.024 & -3.950 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{\lambda} \\ G_{\lambda} \\ B_{\lambda} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Fig. 4 は $\bar{a}_{\lambda}, \bar{c}_{1\lambda}, \bar{c}_{2\lambda}$ を表わしたものであり、Fig. 1 の実線はこのモデルによる明るさ比視感度関数の理論曲線 $V_b^*(\lambda)$ を示す。 $V_b(\lambda)$ と $V_b^*(\lambda)$ はよく一致しており、最大誤差は 400 nm における 0.1 log unit であり、他の波長においては $\pm 0.05 \log$ unit の範囲内であった。

Table 1 Comparison among the CIE luminance, the luminance by Judd, and the brightness estimated by the proposed photometric system.

		x'	y'	L	L_{Judd}	L_b
CIE standard illuminants	A	0.449	0.413	100	100	103
	C	0.314	0.323	100	101	108
	D65	0.316	0.335	100	101	108
CIE fluorescent lamps	F2	0.375	0.380	100	100	104
	F7	0.316	0.336	100	101	108
	F11	0.384	0.384	100	100	104
LED	Yellow	0.457	0.541	100	100	106
	Orange	0.600	0.399	100	100	120
	Red	0.720	0.280	100	100	175
Laser	He-Cd (442 nm)	0.168	0.019	100	165	396
	Ar (514.5 nm)	0.039	0.815	100	100	139
	He-Ne (633 nm)	0.711	0.289	100	100	168
CRT	Blue	0.154	0.076	100	106	178
	Green	0.216	0.678	100	100	126
	Red	0.620	0.333	100	100	134

4. 新しい測光システム

以上のように、輝度チャンネル、(r-g) 反対色チャンネル、(y-b) 反対色チャンネルの分光感度が決まつたので、ある光源の相対分光分布 $S(\lambda)$ が与えられれば、それに対する相対的な明るさ B が(3)式から得られる。しかし、このままでは現在用いられている測光量との関

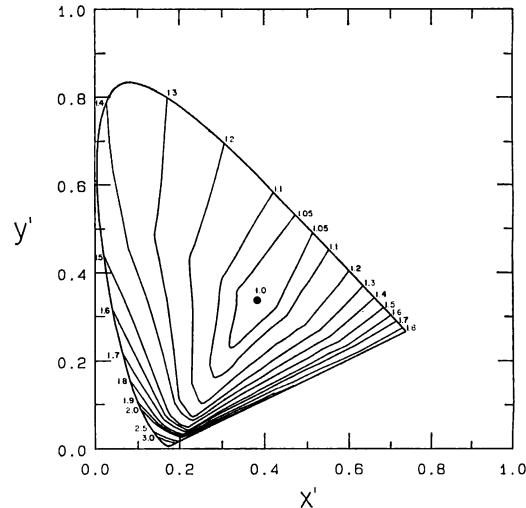


Fig. 5 Loci of constant brightness-luminance ratios predicted by the present model on the chromaticity diagram modified by Judd.

係が与えられないので CIE 表色系とこの明るさモデルとの関係を明らかにする必要がある。

錐体の分光感度は等色関数の線形変換で表わせる¹⁰⁾。Vos は Judd 修正 CIE 等色関数 $\bar{x}'(\lambda), \bar{y}'(\lambda), \bar{z}'(\lambda)$ から錐体の分光感度 $R_\lambda, G_\lambda, B_\lambda$ への変換を次式で表わした。

$$\begin{pmatrix} R_\lambda \\ G_\lambda \\ B_\lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15516 & 0.54308 & -0.03702 \\ -0.15516 & 0.45692 & 0.02969 \\ 0 & 0 & 0.00732 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}'(\lambda) \\ \bar{y}'(\lambda) \\ \bar{z}'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (6)$$

したがって(5)式も $\bar{x}'(\lambda), \bar{y}'(\lambda), \bar{z}'(\lambda)$ の関数で表わせ,

$$\begin{pmatrix} \bar{c}_\lambda \\ \bar{c}_{1\lambda} \\ \bar{c}_{2\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.758 & -0.736 & -0.156 \\ 0 & 0.024 & -0.029 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}'(\lambda) \\ \bar{y}'(\lambda) \\ \bar{z}'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (7)$$

となる。(7)式は等色関数つまり等エネルギースペクトルの三刺激値ばかりでなく一般的な複合放射についての三刺激値から各チャンネル応答への変換についても成立すると考えれば

$$\begin{pmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.758 & -0.736 & -0.156 \\ 0 & 0.024 & -0.029 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$X' = \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}'(\lambda) d\lambda = \frac{x'}{y'} Y' \quad (9)$$

$$Y' = \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}'(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$Z' = \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}'(\lambda) d\lambda = \frac{z'}{y'} Y' \quad (11)$$

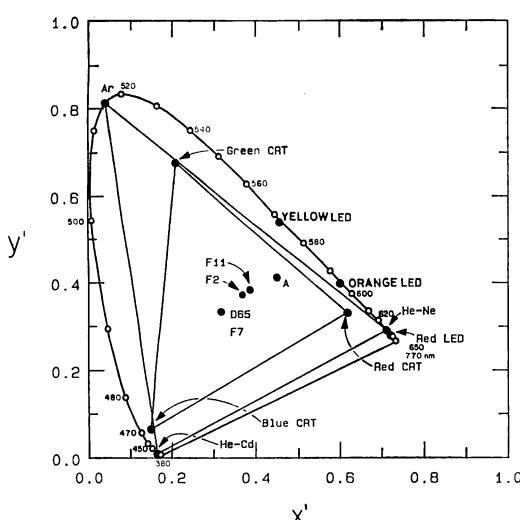


Fig. 6 Chromaticity coordinates of samples of light sources.

となる。ここで A, C_1, C_2 は相対分光分布 $S(\lambda)$ をもつ光源のそれぞれ輝度チャンネル応答, $(r-g)$ 反対色チャンネル応答, $(y-b)$ 反対色チャンネル応答の相対値である。また x', y', z' はこの光源の Judd 修正色度座標である。(3), (8)~(11)式から相対的な明るさ B と, Y', x', y' の関係が次式のように求まる。

$$\left(\frac{Y'}{B} \right)^2 + \left\{ \left(0.914 \frac{x'}{y'} - 0.580 - 0.156 \frac{1}{y'} \right) \frac{Y'}{B} \right\}^{2p} + \left\{ \left(0.029 \frac{x'}{y'} + 0.053 - 0.029 \frac{1}{y'} \right) \frac{Y'}{B} \right\}^{2q} = 1 \quad (12)$$

ここで, Y' は光源 $S(\lambda)$ の Judd 修正輝度, B は明るさに相当するので Y'/B は明るさ - 輝度比の逆数の関係にある。したがって $\beta = B/Y'$ を明るさ - 輝度比とするとき, (12)式から任意の色度座標 (x', y') における明る

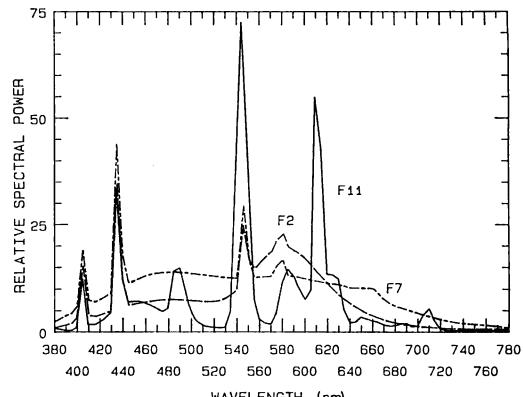


Fig. 7 Relative spectral power distributions of three types of CIE fluorescent lamps.

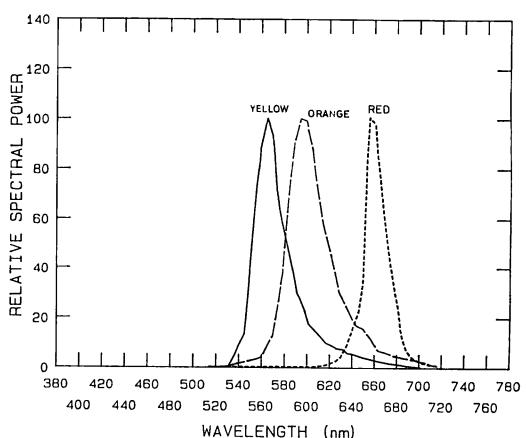


Fig. 8 Relative spectral power distributions of the yellow, orange, and red LED. The three curves are normalized to the same peak value.

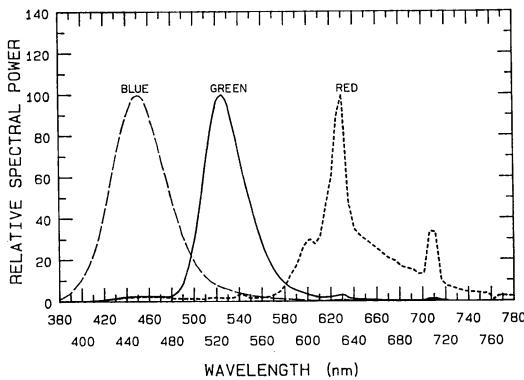


Fig. 9 Relative spectral power distributions of the blue, green, and red phosphors in a color CRT. The three curves are normalized to the same peak value.

さ - 輝度比 $\beta(x', y')$ が得られる。Fig. 5 は Judd 修正色度図における等 $\beta(x', y')$ 軌跡を表わしている。これは輝度を等しくした場合彩度の高い色ほど明るく見えるという Helmholtz-Kohlrausch 効果¹¹⁾を表わしている。さらに輝度の単位 cd/m^2 に対応させて本モデルによる明るさ L_b を次のように定義する。

$$L_b = \beta(x', y') L_{\text{Judd}} \quad (13)$$

ただし

$$L_{\text{Judd}} = K_m \int_{\lambda} L_{e,\lambda} V_{\text{Judd}}(\lambda) d\lambda$$

ここで提案した新しい測光システムにより、CIE の各標準光源、螢光ランプ、カラーディスプレイによく用いられる各種光源について明るさを評価した値 L_b を、CIE 輝度 L 、Judd 修正輝度 L_{Judd} とともに Table 1 に示す。比較のため $L=100$ にしてある。また Fig. 6 はこれらの光源の Judd 修正色度座標を示したものである。ここに用いた螢光ランプの相対分光分布は CIE TC-1.3 による典型的なもの¹²⁾であり、F2 は standard 型、F7 は broad-band 型、F11 は three-narrow band 型である。Fig. 7 にこれらの分光分布曲線を示す。LED についてはその分光分布曲線を Fig. 8 に示す。レーザーは代表的な青、緑、赤のレーザーとして一般によく用いられているものである。カラー CRT はコンピューターグラフィックディスプレイに用いられているもので、その螢光体の相対分光分布曲線を Fig. 9 に示す。

5. おわりに

ここで提案した測光システムは開口色モードの刺激についての実験に基づいている。したがって、その応用範囲は暗黒中の光源色などの unrelated color に限られる。たとえば、Table 1 に示した螢光ランプの明るさはランプ自身の明るさを評価したものである。それによって照明された物体がどのくらいの明るさになるかについては本モデルによる予測だけでは不十分であり、その照明光による色順応効果を考慮に入れる必要がある。すなわち、Fig. 5 で示した等 $\beta(x', y')$ 軌跡は unrelated color に対するものであり、ある照明下に置かれた物体などの related color に対しては、これが変化することが予測される¹³⁾。したがって、related color をも含めた明るさ評価のための測光システムを実現するためには、色順応効果を含めた Helmholtz-Kohlrausch 効果の測定実験あるいは色順応予測式の検討が今後の課題として残されている。

最後に各種光源の分光分布データの提供および測定にご協力いただきましたカナダ国立研究所の Dr. A. Robertson はじめ各位に感謝いたします。また本研究の主たることは東京工業大学で行なわれたことを付記しております。

文 献

- 1) Commission Internationale de l'Eclairage: *CIE Publication No. 41* (CIE, Paris, 1978).
- 2) 矢口博久、池田光男: 光学, 9 (1980) 44.
- 3) H. Yaguchi and M. Ikeda: Vision Res., 23 (1983) 1711.
- 4) M. Ikeda, H. Yaguchi and K. Sagawa: J. Opt. Soc. Am., 72 (1982) 1660.
- 5) 池田光男: 照明学会誌, 66 (1982) 417.
- 6) J. J. Vos: Color Res. Appl., 3 (1978) 125.
- 7) S. L. Guth and H. R. Lodge: J. Opt. Soc. Am., 63 (1973) 450.
- 8) C. R. Ingling, Jr. and B. H. Tsuo: Vision Res., 17 (1977) 1075.
- 9) V. C. Smith and J. Pokorny: Vision Res., 15 (1975) 161.
- 10) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 1980) p. 210.
- 11) 矢口博久、池田光男: 照明学会誌, 64 (1980) 566.
- 12) Commission Internationale de l'Eclairage: *CIE Publication No. 15.2* (CIE, Paris, 1982).
- 13) G. Wyszecki and C. L. Sanders: J. Opt. Soc. Am., 47 (1957) 840.