



明るさ知覚モデルとその個人データへの適用

中野 靖久

東京工業大学大学院総合理工学研究科 T227 横浜市緑区長津田町 4259

(1992年5月6日受付, 1992年7月21日受理)

A Model for Brightness Perception and Its Application to Individual Data

Yasuhisa NAKANO

Department of Intelligence Science, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received May 6, 1992; Accepted July 21, 1992)

Spectral luminous efficiency functions with heterochromatic brightness matching for 12 subjects were analyzed to make a formula for brightness perception which can explain individual difference. The formula was highly based on the visual mechanisms. A logarithmic nonlinearity of the cone photoreceptors and L-M and M-L type opponent mechanisms were utilized to make the formula. The individual difference was explained by adjusting an opponency of each opponent mechanism. The formula also explains the data of compound light as well as the spectral data, which is confirmed by drawing contour map of the brightness to luminance ratio within the CIE *xy*-chromaticity diagram.

1. はじめに

明るさは人間の視覚にとって重要な感覚であり、また照明や視環境の評価においても重要な要素である。現在の測光システムでは、輝度を明るさの評価に用いているが、その計算の基になる視感度は、国際照明委員会(CIE)で定義された $V(\lambda)$ 関数であり、この関数はおもに交照法(flicker photometry)によるデータを基に標準化されている。交照法の原理は、二つの色光を時間的に交互に 10~20 Hz 程度で表示したとき、そのちらつきが最小になるところで二つの色光の明るさが一致すると見えるところにある。交照法の利点は、データの個人差が少なく安定しているという点と、加法則が成立するという点にある。加法則が成り立つという特徴は、輝度 L を次の積分で計算する場合に必要となる。

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

ここで、 $L_{e,\lambda}$ は色光の分光放射輝度で、 K_m は最大視感度で 683 lm/W である。

この定義にしたがって二つの色光の輝度をそろえた場合、これらを併置して比べてみると、その明るさは必ずしも同じにはならず、一般に色のより鮮やかな色光の方がより明るく見える。この効果は、Helmholtz-Kohlrausch 効果として古くから知られており、明るさの加法則が成り立たない原因にもなっている。また、このような直接比較法による明るさマッチング(heterochromatic brightness matching)のデータは、個人差が大きいという特徴があり¹⁾、こうしたことから CIE による視感度の標準化にはデータとして採用されなかった。しかし、実際に人間が知覚する明るさを評価するという目的のためには、交照法ではなく直接比較法のデータを用いる必要がある。そこでここでは、直接比較法にみられるデータの個人差を分析し、その原因がどこにあるのかを探り、またその個人差を説明可能な明るさ知覚のモデルあるいは実験式を構築することを試みる。

2. 実験データ

実験データには Ikeda と Nakano²⁾ の 12 名の明るさ

分光感度曲線を用いる。このデータの実験条件を次に示す。視野サイズは 2° で、右が参照光、左がテスト光の垂直二分視野。参照光は100 Tdの白色光でその色度座標は $x=0.37$, $y=0.39$ 。テスト光は400~700 nmの単色光で10 nm間隔でとられた。刺激の呈示は、3秒おきに1秒間の繰返し呈示である。実験は調整法で行われ、被験者がテスト光の強度を調節することにより明るさマッチングを行い、マッチングが成立したときのテスト光の強度の逆数をもって感度とした。

Fig. 1 に12名のデータを示す。横軸はテスト光の波長、縦軸は相対分光感度の対数値で、それぞれの被験者の交照法で得られた分光感度のピークをゼロにするように規格化されている。この図からわかるように、被験者によって明るさ分光感度はかなり大きく異なる。上の段の被験者ほど全体に高い感度を示し、はっきりした二つ山の形状を示している。下の段の被験者にいくにしたがって、この傾向は減少し、全体に感度が低下し、形状もCIE $V(\lambda)$ に近い一つ山の形状になってくる。また、全体の感度の上下だけではなく、中波長と長波長に見られる山の高さのバランスも被験者によって異なる傾向が見られる。Fig. 1ではおおよそ、左側に中波長の山が高くする被験者、右側に長波長の山が高くする被験者を配置している。このように、被験者間の相違にはある種の規則性が見られるようと思われる。第5節では、こうした個人差を視覚メカニズムを考慮した実験式により説明

することを試みる。

3. 明るさ知覚モデルの現状

明るさ知覚に関するモデルはすでにいくつか提案されている。その基本的な考え方は多くのモデルで共通しており、明るさと輝度の違いを色チャンネルの寄与として説明している。**Fig. 2** は一人の被験者の明るさマッチ

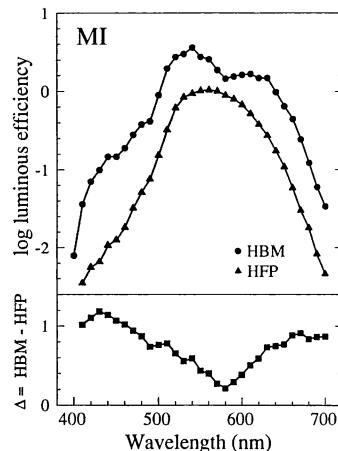


Fig. 2 Comparison between spectral luminous efficiency functions obtained with heterochromatic brightness matching (HBM) and with heterochromatic flicker photometry (HFP) for one subject²⁾. Bottom panel shows log difference between these two curves.

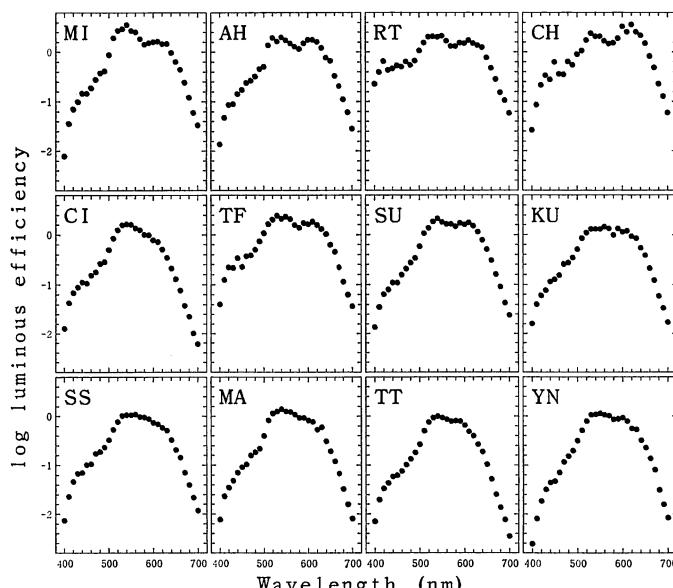


Fig. 1 Spectral luminous efficiency functions obtained with heterochromatic brightness matching method for 12 subjects²⁾.

ングと交照法による分光感度関数²⁾の差を対数でプロットしたものであるが、この形状は 570 nm 付近で差が最小となり、これより短波長あるいは長波長にいくにしたがって差は増大する。この形状は、彩度関数と類似しており、色みの強さが明るさ知覚に寄与していることをうかがわせる。このような観察から Guth と Lodge³⁾は明るさ L^{**} を輝度チャンネルの出力 A 、赤-緑反対色チャンネルの出力 T 、黄-青反対色チャンネルの出力 D の出力のベクトルと $L^{**} = \sqrt{A^2 + T^2 + D^2}$ で表した。また Yaguchi と Ikeda⁴⁾ は反対色チャンネルの出力に幂の非線形性を導入することにより Guth らのモデルを改良している。これらの他にも同様の考え方に基づいた明るさ知覚のモデルが提案されている^{5,6)}。

Nakano ら⁷⁾も明るさ知覚を反対色チャンネル（より正確には opponent メカニズム）の寄与として説明しているが、前述のモデルとは少し視点が異なっている。まず明るさの知覚を説明するためには Yaguchi ら⁴⁾と同様に視覚系の非線形性を考慮することが必要であることを指摘しているが、Nakano（筆者）ら⁷⁾は錐体の出力に對数的非線形性を導入した。猿やその他の脊椎動物を用いた電気生理的な研究では錐体出力の非線形性は顕著に表れており^{8,9)}、その特性は一般に次のような式を用いて表現される⁹⁾。

$$V = V_{\max} \frac{I^n}{I^n + \sigma^n}. \quad (2)$$

ここで、 V は錐体視細胞の膜電位、 V_{\max} はその最大値、 I は入射光の強度、 n および σ は曲線の形状を決めるパラメータである。

Fig. 3 に $n=1$ とし、いくつかの σ の値を用いたときの関数の形状を、横軸に対数軸をとって示す。この関数の形状から、 $I=\sigma$ 付近では直線で近似され、この付近では對数的非線形性が見られることがわかる。また、順応レベルを変えると σ の値は変化し、直線部分がレベルの中心にくるようにシフトすることを考えると、対数による近似はかなり広範囲の順応レベルで成り立つことが期待される。

筆者らのモデル⁷⁾の第 2 の特徴は、輝度と明るさの違いを輝度チャンネルの出力に色チャンネルの出力を加えることで説明するのではなく、明るさは opponent メカニズムそのものの出力によって決まるとする点である。この opponent メカニズムには 2 種類あり、L-錐体 (long-wavelength-sensitive cones) と M-錐体 (middle-wavelength-sensitive cones) の拮抗性の違いから L-M 型と M-L 型に分けられる。筆者らは、明るさの知覚は

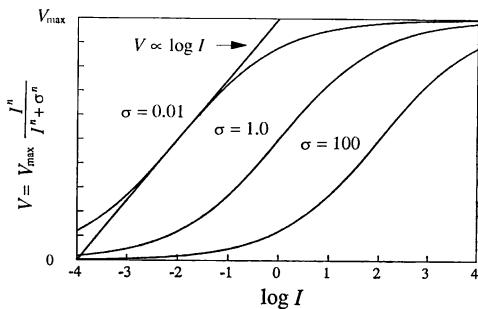


Fig. 3 Sigmoid functions of Eq.(2) with three different parameters, $\sigma = 100, 1.0, 0.01$. A parameter n was set to 1.0 arbitrary. Each curve is approximated by a straight line, $V \propto \log I$, at around $I = \sigma$.

二つの opponent メカニズムのうちより大きな出力を持つもので決まるとしている。L-M, M-L のような opponent メカニズムは電気生理的な研究でも猿の神経節細胞や外側膝状体において見いだされており^{10,11)}、これらの細胞の出力が明るさの知覚に寄与していることは十分に考えられる。また、二つのメカニズムのうち出力の大きい方で明るさの知覚が決まるとする点も、明るさマッチングのような閾上の刺激に対しては確率的寄せ集めの効果は小さいことを考えると、ベクトル和のような異種のメカニズムの出力の不完全な足し合わせを考えるよりも自然なように思われる。なぜなら、ベクトル和はある近似の下では確率的寄せ集めの特殊な場合と考えられるからである¹²⁾。ここでは、筆者らのモデルに改良を加え、前述の 12 名の明るさ分光感度曲線を説明するとともに、単色光だけでなく複合光、すなわち色度図内部の色光のデータをも説明できるようにする。

4. 明るさ知覚の定式化の方法

明るさの知覚を定量化する際、ここでは等価輝度 L_{eq} を用いる。等価輝度とは、測定対象の色光と同じ明るさに見える基準参照光の輝度である。等価輝度を用いると、あらゆる色光の明るさの大小関係を基準参照光の輝度というスケールの上で比較することができる。モデルや実験式を用いて等価輝度を求めるには次のようにする。背景条件が一定ならば、色光の明るさはその色度座標 (x, y) と輝度 L が決まれば一意的に決まるので、これらの関数として $F(x, y, L)$ と表すことができる。参考光 $(x_{ref}, y_{ref}, L_{ref})$ とテスト光 $(x_{test}, y_{test}, L_{test})$ が同じ明るさであるということは、

$$F(x_{ref}, y_{ref}, L_{ref}) = F(x_{test}, y_{test}, L_{test}) \quad (3)$$

と表されるので、 L_{ref} についてこの式を解けば、これが

テスト光と同じ明るさに知覚される参照光の輝度、すなわち等価輝度 L_{eq} である。

式(3)を L_{ref} について解くとその解は一般には複雑な非線形方程式となるが、色光を記述する座標系や基準参照光をうまく選ぶことにより比較的簡単な式にすることができる。たとえば、筆者ら(1988)のモデル¹⁷⁾では明るさが

$$F(R, G, B) = \alpha \log R + \beta \log G + \gamma \log B \quad (4)$$

という式で決まると考える。ここで、 R, G, B は L-, M-, S-錐体の視物質に対する光の吸収量で、色光の x, y 色度座標と輝度 L から三刺激値 X, Y, Z を求め、これらの線形変換により計算できる。 α, β, γ は定数であり、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ となる。今、基準参照光に対する 3 種の錐体の光吸収量を $R_{ref}, G_{ref}, B_{ref}$ とし、これらが等しくなるような光を基準参照光に選び、光吸収量の絶対値には任意性があるので、輝度の単位に一致するように参照光の輝度 L_{ref} を用いて $R_{ref} = G_{ref} = B_{ref} = L_{ref}$ と規格化を行うことができる。この時、基準参照光に対して式(4)は、

$$F(R_{ref}, G_{ref}, B_{ref}) = \log L_{ref} \quad (5)$$

となる。さらに、任意のテスト色光に対する光吸収量を R, G, B とし、 $L_{ref} = L_{eq}$ に注意すると、式(3)～(5)から、

$$\log L_{eq} = \alpha \log R + \beta \log G + \gamma \log B \quad (6)$$

となり、任意の色光に対する等価輝度 L_{eq} が簡単に計算できる。

基準参照光をうまく選ぶことが等価輝度の計算を簡略化するための重要なポイントとなるわけであるが、ここでは基準参照光として、CIE D₆₅ を用いることにする。その理由は定義が確立されていること、白色光に対して錐体の活動が等しくなると考えるのは妥当性があること¹⁸⁾、またすでに Nayatani ら^{14,15)}によって D₆₅ を基準とした錐体分光感度の導出が行われていることなどがあげられる。このとき、3 種の錐体に対する光の吸収量 R, G, B は三刺激値 X, Y, Z から

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.22630 & 1.16532 & 0.04570 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.91822 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (7)$$

によって計算される。ここで用いる行列は Estévez-Hunt-Pointer の錐体分光感度曲線を基にして得られる^{15,16)}。

5. 新しい明るさ知覚の実験式

ここで提案する明るさ知覚の実験式は、基本的には

式(4)で表される筆者ら¹⁷⁾のモデルに基づいている。式(4)では、錐体の非線形性を表す関数として $\log R$ 等の関数を用いているが、長波長のスペクトル領域では S-錐体の感度がゼロになり、 $B=0$ となるので $\log B$ の計算が困難になる。この困難を回避するのが第一の改良点である。また式(4)では、 α, β, γ は定数であったが、定数であると色度図全域における明るさ知覚特性を説明しきれないので、これらを定数ではなく 3 種の錐体の活動によって変化する関数であると考えるのが第二の改良点である。改良後の式を次に示す。

$$\log\left(\frac{L_{eq}}{L}+1\right) = \alpha(\xi, \eta, \zeta) \log(\xi+1) + \beta(\xi, \eta, \zeta) \log(\eta+1) + \gamma(\xi, \eta, \zeta) \log(\zeta+1), \quad (8)$$

ここで、 $\xi = R/L, \eta = G/L, \zeta = B/L$ であり、これらは輝度の単位で規格化した 3 種の錐体の光吸収量 R, G, B と輝度 L の比を表しており、これらをそれぞれの錐体の活動度と呼ぶことにする。また各錐体の寄与関数 $\alpha(\xi, \eta, \zeta), \beta(\xi, \eta, \zeta), \gamma(\xi, \eta, \zeta)$ の具体的な関数形は

$$\begin{aligned} \alpha(\xi, \eta, \zeta) &= \alpha_0 + \frac{k_1 \xi}{\xi + \eta + \zeta} + k_2 (\eta - \zeta) \xi, \\ \beta(\xi, \eta, \zeta) &= \beta_0 + \frac{k_1 \eta}{\xi + \eta + \zeta} + k_2 (\zeta - \xi) \eta, \\ \gamma(\xi, \eta, \zeta) &= \gamma_0 + \frac{k_1 \zeta}{\xi + \eta + \zeta} + k_2 (\xi - \eta) \zeta \end{aligned} \quad (9)$$

で与えられる。

この関数形の具体的な意味はまだよくわからないが、大まかな意味づけをするとすれば、第 1 項は定数で、各錐体の寄与の正負および大きさを決める主要な項である。第 2 項は、各錐体の活動度の比に比例した項で、 k_1 が正ならば相対的に大きな活動度を持つ錐体ほど正の寄与が大きくなることを表している。後に述べるように、 k_1 は常に正となる。第 3 項は、最も影響の小さい修正項で、他の 2 種の錐体の活動度の差と自分自身の活動度の積に比例する。この項は、反対色メカニズムとの相互作用を反映しているのではないかと推察される。

式(8), (9) により記述されるのは、ある特定の反対色メカニズムであるが、前述のように、反対色メカニズムには L-M 型と M-L 型の 2 種類があり、明るさはこれらの出力の最大値で決まると考える。Fig. 4 にこの点も含めた等価輝度 L_{eq} の計算のブロックダイアグラムを示す。各錐体の活動度 ξ, η, ζ は、対数的非線形性 $\log(\xi+1)$ 等を被り、次に L-M 型と M-L 型の反対色メカニズムで異なる寄与関数 $\alpha_{L-M}(\xi, \eta, \zeta), \beta_{L-M}(\xi, \eta, \zeta), \gamma_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$ と $\alpha_{M-L}(\xi, \eta, \zeta), \beta_{M-L}(\xi, \eta, \zeta), \gamma_{M-L}(\xi, \eta, \zeta)$

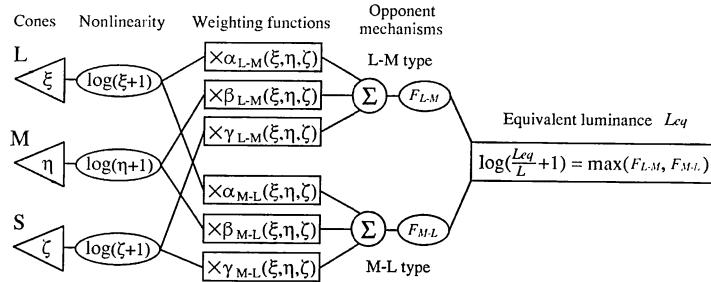


Fig. 4 Block diagram for calculation of equivalent luminance L_{eq} using Eqs. (8) and (9).

が掛け合わされ、次にそれぞれの和 F_{L-M} と F_{M-L} を計算する。これらは式(8)の右辺に対応する。明るさを決めるのは、これらの内大きい方であるので、最終的に等価輝度 L_{eq} を

$$\log\left(\frac{L_{eq}}{L}+1\right)=\max(F_{L-M}, F_{M-L}) \quad (10)$$

により計算する。

計算の際必要になるパラメータは、式(9)に含まれる $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, k_1, k_2$ であるが、2種の反対色メカニズムにそれぞれ別のパラメータ $\alpha_{0,L-M}, \beta_{0,L-M}, \gamma_{0,L-M}, k_{1,L-M}, k_{2,L-M}$ と $\alpha_{0,M-L}, \beta_{0,M-L}, \gamma_{0,M-L}, k_{1,M-L}, k_{2,M-L}$ が必要となるので、合計 10 個ある。実際は、

$$\alpha(\xi, \eta, \zeta) + \beta(\xi, \eta, \zeta) + \gamma(\xi, \eta, \zeta) = 1 \quad (11)$$

という拘束条件があるので、

$$\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + k_1 = 1 \quad (12)$$

となり、 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ が決まれば、 k_1 が自動的に決まってしまうので、 $k_{1,L-M}$ と $k_{1,M-L}$ は独立なパラメータではない。したがって、8個のパラメータを調節して、データへのフィッティングを行うことになる。

フィッティングは非線形最小二乗法を用い、最初に適当なパラメータの初期値を推定し、各種最小化アルゴリズムを組み合わせて最小二乗解を探索する。この際、最適解ではなく局所解に落ち込む可能性を完全に排除することはできないが、何度か初期値を変えてフィッティングを行っても解が変わらないことは確認した。

実際にフィッティングを行ってみると、L-M 型反対色メカニズムに対する S-錐体の寄与を決めるパラメータ $\gamma_{0,L-M}$ は、分光感度データだけを用いた場合には、うまく決定できないことがわかった。なぜなら、このメカニズムは $\zeta \approx 0$ となる長波長領域で働くので、 $\gamma_{0,L-M}$ を変えてもこの領域の明るさ分光感度の計算値はほとんど変わらないからである。ここでは便宜上 $\gamma_{0,L-M}=0$ とし、残りの 7 個のパラメータによりフィッティングを行った。色度図内部の複合光のデータに対してフィッティ

ングを行う場合には、このパラメータも有効になってくると考えられる。

6. 新しい実験式による実験データの解析結果

Fig. 5 は、3名の被験者 MI, KU, YN の 2° 視野のデータに対するフィッティングの例である。中段のグラフは各被験者の明るさ分光感度のデータ（黒丸）と式(8), (9)による理論曲線（実線および点線）をプロットしたものである。理論曲線は L-M メカニズムのものと、M-L メカニズムのものの 2 本が描かれており、これらの曲線の上の包絡線を実線で、それ以外の部分を点線で示している。被験者 MI で短波長領域に三つめの曲線が見られるのは、L-M メカニズムに属するもので、独立した別のメカニズムではない。上段のグラフは、L-M メカニズムにおける各錐体の寄与関数をプロットしたもので、破線が L-錐体の寄与関数 $\alpha_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$ 、一点鎖線が M-錐体の寄与関数 $\beta_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$ 、実線が S-錐体の寄与関数 $\gamma_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$ を表す。また、点線はゼロの位置を示し L-錐体の寄与関数は常に正、M-錐体の寄与関数は常に負、S-錐体の寄与関数は短波長領域で正、長波長領域でほとんどゼロになることがわかる（これは $\gamma_{0,L-M}=0$ としたためである）。これが L-M メカニズムと呼ばれる所以である。同様に、下段のグラフは M-L メカニズムにおける各錐体の寄与関数をプロットしたもので、被験者 YN の場合を除いて M-錐体の寄与が正、L-錐体の寄与が負になっている。式(9)における各被験者ごとのパラメータの値を Table 1 に示す。

被験者間の個人差は、この寄与関数の違いにより説明することができる。最も特徴的な違いは、L-錐体の寄与と M-錐体の寄与の拮抗性の違いである。被験者 MI のように明るさの分光感度が $V(\lambda)$ に比べて大きく上昇し、はっきりした二つ山の形状を示す場合は、L-M, M-L メカニズムとともに寄与関数の絶対値が大きく、強い

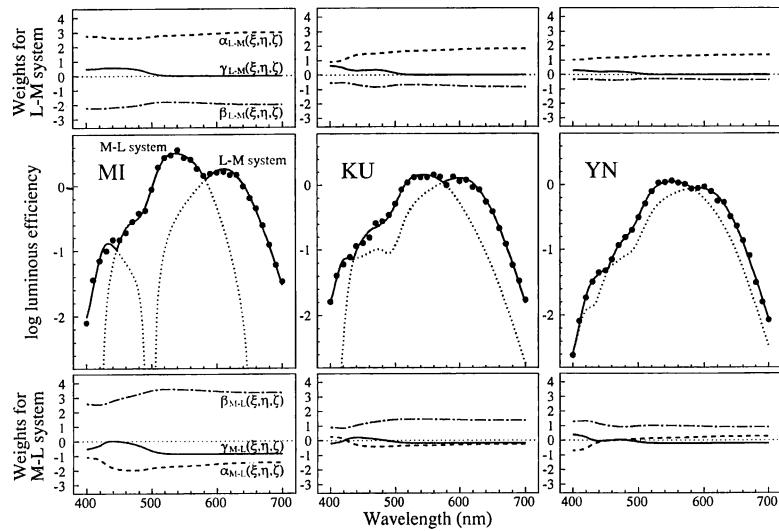


Fig. 5 The results of curve fitting to the data for three subjects with Eqs. (8) and (9). Middle row : experimental data (filled circles) and theoretical curves (solid and dotted lines). Upper envelope of the theoretical curves is represented by solid line. Top row : Weighting functions $\alpha_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$, $\beta_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$ and $\gamma_{L-M}(\xi, \eta, \zeta)$, defined in Eq. (8), for L-M type mechanism as a function of wavelength. Bottom row : The same as top panels but for M-L type mechanism.

Table 1 Parameters required to fit the equations (8) and (9) to the data in terms of least square method for 12 subjects. A parameter $\gamma_{0,L-M}$ was set to zero because otherwise good fits could not be obtained.

Sub.	$\alpha_{0,L-M}$	$\beta_{0,L-M}$	$\gamma_{0,L-M}$	$k_{1,L-M}$	$k_{2,L-M}$	$\alpha_{0,M-L}$	$\beta_{0,M-L}$	$\gamma_{0,M-L}$	$k_{1,M-L}$	$k_{2,M-L}$
M I	2.572	-2.117	0.0	0.545	-0.001	-2.019	3.156	-0.863	0.726	-0.005
A H	2.346	-1.851	0.0	0.505	0.001	-1.266	2.345	-0.353	0.273	-0.008
R T	2.688	-2.645	0.0	0.957	0.003	-2.468	3.529	-0.422	0.360	-0.014
C H	3.194	-2.931	0.0	0.737	-0.001	-1.501	2.548	-0.266	0.218	-0.012
C I	0.498	0.040	0.0	0.462	0.003	-0.630	1.409	-0.411	0.632	0.008
T F	1.964	-1.659	0.0	0.695	0.001	-1.712	2.803	-0.275	0.184	-0.006
S U	1.665	-1.041	0.0	0.376	0.002	-0.223	1.238	-0.219	0.204	-0.005
K U	1.484	-0.910	0.0	0.426	0.003	-0.426	1.340	-0.161	0.247	-0.003
S S	1.212	-0.638	0.0	0.425	0.002	-0.211	1.039	-0.197	0.369	-0.0003
M A	0.992	-0.362	0.0	0.371	0.002	-0.392	1.384	-0.282	0.290	-0.003
T T	0.503	0.115	0.0	0.382	0.003	-0.028	0.736	-0.398	0.690	0.005
Y N	1.176	-0.420	0.0	0.243	0.001	0.033	0.848	-0.187	0.306	0.004

拮抗性を示している。KU, YN と二つ山が小さくなり V(λ) 型に近づくにつれ、この拮抗性は弱まり、寄与閾数の絶対値が小さくなってくる。また、はっきりした二つ山を示す被験者の中でも、被験者によって長波長の感度の山が高くできる場合（例：CH）と中波長の感度の山が高くなる場合（例：MI）があり、被験者間で左右の山の高さに違いが見られる。このような被験者の特徴は、

L-M と M-L メカニズムそれぞれの拮抗性の大きさのバランスを変えることで説明される。また、短波長領域での感度の個人差も見られ（例：RT と TF），この特徴は短波長領域での S-錐体の寄与の大きさの違いとして説明される。

Fig. 6 に式(8), (9)による 12 名の被験者すべてに対するフィッティングの結果を示す。この図から、す

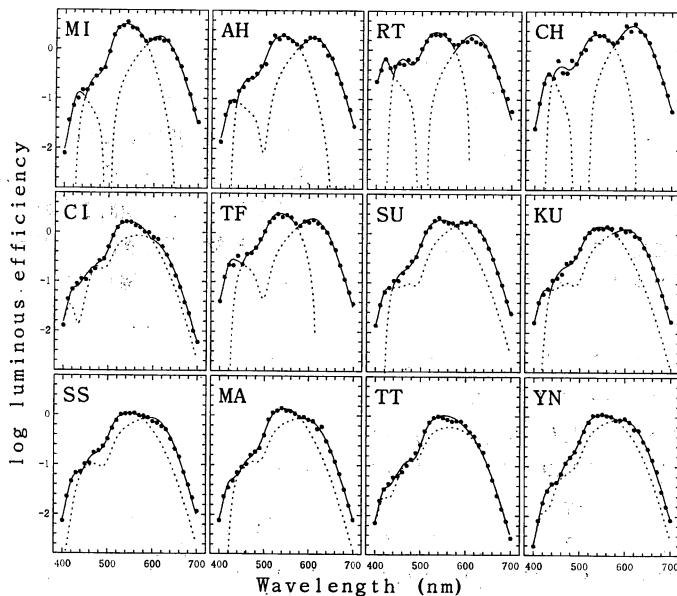


Fig. 6 The results of curve fitting for all 12 subjects.

べての被験者に対して上述の実験式は有効であり、明るさ知覚特性の個人差を非常に精度で記述できることが確認された。

7. 考 察

ここで用いた実験データは明るさの分光感度曲線であったが、実験式自体はこのデータのみを説明するためだ

けに考慮したものではなく、色度図内部のデータに対しても適用できるように考慮している。式(8), (9)のように関数 $\alpha(\xi, \eta, \zeta)$, $\beta(\xi, \eta, \zeta)$, $\gamma(\xi, \eta, \zeta)$ を導入した第一の理由は、色度図内部のデータをも説明することにある。色度図内部の明るさマッチングのデータも、数多く集められているが¹⁷⁾、個人差に関する系統的なデータはまだ公表されていないので、ここでは CIE の 2° 視野

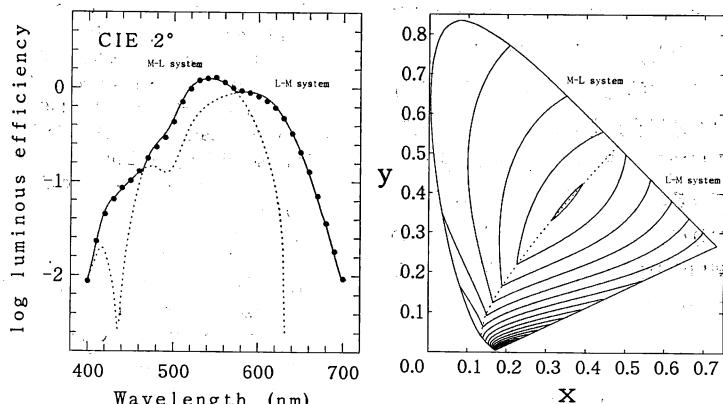


Fig. 7 Left : Standard spectral luminous efficiency function for brightness for 2° field reported in CIE technical report¹⁾ (filled circles), and theoretical curves fitted to it using Eqs. (8) and (9). Right : Contour map of brightness-to-luminance ratio in log unit ($\log(L_{\text{ref}}/L_{\text{test}})$) where L_{ref} and L_{test} represent luminances of reference and test lights used in the heterochromatic brightness matching. Inmost curve has a value of 0, and it increases in 0.05 log step as contour goes outside. Dotted line represents a border between L-M dominant area and M-L dominant area.

明るさ分光感度曲線を説明するように式(9)のパラメータを決めたとき、色度図内部の等 B/L の等高線^{*1}がどのように予測されるかを見るにとどめる。Fig. 7 左は CIE の明るさ分光感度データに実験式をフィットした結果で、同図右はこのときのパラメータを用いたときの xy 色度図内部の等 B/L の等高線をプロットしたものである。定量的な比較はここではできないが、多くの実験データが示す特徴をかなりよく説明することが確認された。

明るさ分光感度のデータを、主成分分析にかけて個人差を分析する手法^{18,19)}では、第一主成分として約 570 nm を谷として長、短波長にいくにしたがって増大する、いわゆる彩度閾数に似た形状の成分が現れる。これは、明るさに対する反対色メカニズムの寄与の大きさの個人差を表す成分と考えられる。また、第二主成分として約 570 nm を境として長波長で正、短波長で負となる成分が現れる(符号は反転してもよい)。これは、中波長領域の感度と長波長領域の感度のバランスを変える成分である。このような分析と、ここで提案した明るさ知覚のメカニズムを比較してみると、よく対応していることがわかる。提案した実験式による明るさ分光感度曲線は、L-M あるいは M-L メカニズムの拮抗性が強くなると山が高くなり、はっきりした二つ山の形状になる。この時の二つのメカニズムの拮抗性には相関があり、L-M メカニズムの拮抗性が強い被験者は M-L メカニズムの拮抗性も強い傾向がある。したがって、主成分分析における第一主成分は両メカニズムの拮抗性の平均的強さに対応させることができる。しかし、この相関は完全ではなく、被験者によって L-M の拮抗性が M-L のものより強い場合や、その逆になる場合がある。これが第二主成分に対応し、中波長と長波長の感度のバランスを変えていると考えることができる。主成分分析では、第二主成分まで個人差のかなりの部分を説明できるとされているので、この見を利用して実験式の中の被験者によって変えなければならないパラメータの数を減らすことができるかもしれない。

8. おわりに

ここで提案した実験式は、実験式とはいうもののかなりの部分視覚メカニズムを考慮していることは第 4, 5 節で述べた。しかし、すべてがメカニズムと対応づけられ

るわけではない。特に、式(9)で表される寄与関数は実験データを説明するために導入されたもので、生理的メカニズムに基づいてはいない。そのために、現段階では実験式として提案したが、現在この寄与関数の理論的根拠を検討中であり、その糸口を見いだした段階である。今後はこうした検討を進め、明るさ知覚メカニズムの完全な理解に近付きたいと考えている。

最後に、本研究に関して多くの有益な助言をいただいた京都大学の池田光男教授ならびに千葉大学の矢口博久助教授に深く感謝いたします。

文 献

- M. Ikeda and Y. Nakano: "Spectral luminous-efficiency functions obtained by direct heterochromatic brightness matching for point sources and for 2° and 10° fields," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 2105-2108.
- M. Ikeda and Y. Nakano: "The stiles summation index applied to heterochromatic brightness matching," *Perception*, **15** (1986) 765-776.
- S. L. Guth and H. R. Lodge: "Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model," *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 450-462.
- H. Yaguchi and M. Ikeda: "Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching," *Vision Res.*, **23** (1983) 1711-1718.
- R. W. G. Hunt: "A model of colour vision for predicting colour appearance," *Color Res. Appl.*, **7** (1982) 95-112.
- Y. Nayatani, K. Takahama and H. Sobagaki: "Prediction of color appearance under various adapting conditions," *Color Res. Appl.*, **11** (1986) 62-71.
- Y. Nakano, M. Ikeda and P. K. Kaiser: "Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models," *Vision Res.*, **28** (1988) 799-810.
- R. M. Boynton and D. N. Whitten: "Visual adaptation in monkey cones: recordings of late receptor potentials," *Science N.Y.*, **170** (1970) 1423-1426.
- R. A. Normann and F. S. Werblin: "Control of retinal sensitivity I. Light and dark adaptation of vertebrate rods and cones," *J. Gen. Physiol.*, **63** (1974) 37-61.
- P. Gouras and E. Zrenner: "Color coding in primate retina," *Vision Res.*, **21** (1981) 1591-1598.
- A. Valberg, B. B. Lee and J. Tryti: "Simulation of responses of spectrally-opponent neurones in the macaque lateral geniculate nucleus to chromatic and achromatic light stimuli," *Vision Res.*, **27** (1987) 867-882.
- R. F. Quick Jr.: "A vector-magnitude model of contrast detection," *Kybernetik*, **16** (1974) 65-67.
- J. Walraven and J. S. Werner: "The invariance of unique white; a possible implication for normalizing cone action spectra," *Vision Res.*, **31** (1991) 2185-2193.
- Y. Nayatani, K. Takahama and H. Sobagaki: "Prediction of color appearance under various adapting conditions," *Color Res. Appl.*, **11** (1986) 62-71.
- Y. Nayatani, K. Hashimoto, K. Takahama and H.

*1 B/L は brightness to luminance ratio と呼ばれ、明るさマッチングした時の参照光の輝度 L_{ref} とテスト光の輝度 L_{test} により L_{ref}/L_{test} と定義される。

- Sobagaki : "A nonlinear color-appearance model using Estévez-Hunt-Pointer primaries," *Color Res. Appl.*, **12** (1987) 231-242.
- 16) R. W. G. Hunt and M. R. Pointer : "A color-appearance transform for the CIE 1931 standard colorimetric observer," *Color Res. Appl.*, **10** (1985) 165-179.
- 17) 数多くあるが、ここではレビュー的な論文として次のものを引用するにとどめる。
内川恵二、内川弘美、P. K. Kaiser : "色光の“明るさ-輝度差”の色度の違いによる変化", 照明学会誌, **68** (1984) 259-264.
- 18) M. Ikeda, J. Ikeda and M. Ayama : "Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness," *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 31-44.
- 19) H. Yaguchi, M. Yamada, A. Kawada and Y. Miyake : "Individual variations of contribution of opponent color channels to brightness," *CIE Proceedings 22nd Session* (Melbourne, 1991) Division 1, pp. 63-66.