

## 研究

## 薄明視における明るさ知覚モデル

中野 靖久・池田 光男

東京工業大学総合理工学研究科物理情報工学専攻 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1986年4月19日受理)

## A Model for the Brightness Perception at Mesopic Levels

Yasuhisa NAKANO and Mitsuo IKEDA

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

To investigate the rod-cone interaction for brightness perception, the additivity was investigated by the heterochromatic brightness matching at mesopic levels for four pairs of monochromatic lights. When one of the pair stimulated mainly rods and another cones, a clear additivity failure of the efficiency enhancement type was found at mesopic levels. To explain this phenomenon and other features, a new model was proposed for the brightness perception at mesopic levels. The model can be readily applied to evaluate lights for their brightness at mesopic levels.

## 1. はじめに

人間の視覚系は、光の強度レベルに応じてその機能が変化する。明るい環境では網膜は、細かい物を見たり、色を知覚したりすることができるように構成され、ここでは錐体視細胞が働いている。一方、非常に暗い環境では、わずかな光に対しても応答できるよう網膜は再構成され、ここでは数の多い桿体視細胞が働くようになっている。こうした機能の変化に対応して、現在の測光システムでは、二つの測光量を次のように定義している。

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

$$L' = K_m' \int L_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式(1)は明所視測光量、(2)は暗所視測光量で、 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ は、明所視および暗所視比視感度関数 (photopic and scotopic relative luminous efficiency functions) であり、それぞれ1924、1951年に国際照明委員会(CIE)によって勧告された。これらはいずれも心理物理実験のデータに基づいて定められたものであり、 $V(\lambda)$ は錐体系の特性を表わし、 $V'(\lambda)$ は桿体の特性を表わしているということが出来る。式(1)、(2)では、測光量として輝度の例を示している。したがって、 $L_{e,\lambda}$ は、評価しようとする

光の分光放射輝度である。また  $K_m$ 、 $K_m'$  は最大視感度で、それぞれ 683 lm/W、1,745 scotopic lm/W という定数である。

明所視および暗所視の測光量は、上述のように人間の視覚に基づいた心理物理量として定義され、光の量を人間の明るさ感覚に基づいて評価するために用いられている。しかし、現実の視環境は、明所視と暗所視だけでなく、その中間領域である薄明視が広く存在する。この領域では、網膜の機能は錐体系から桿体系へと急激に移行するわけではなく、徐々に連続的に移行する (Kinney<sup>1)</sup>, Palmer<sup>2)</sup>, Ikeda ら<sup>3)</sup>, Sagawa ら<sup>4)</sup>)。したがって、視覚系は明所視と暗所視の中間の特性を示し、明所視および暗所視の測光量は、どちらも人間の明るさ感覚とは忠実に対応しなくなってくる。そこで近年視環境整備の立場から、照明工学ならびに測色工学の方面で、薄明視においても人間の視覚に忠実な光の量の評価システムを確立することが要求されている。

このような評価システムを確立するための基礎となるデータとしては、まず薄明視領域での比視感度関数が上げられる。これに関しては、すでにかなりまとまったデータが集められており、これを説明するための実験式もいくつか提案されている (Palmer<sup>5,6)</sup>, Kokoschka ら<sup>7)</sup>,

Ikeda ら<sup>9)</sup>, Sagawa ら<sup>4)</sup>). したがって, 次の課題は, 複合光に対しても適用可能な実験式あるいはモデルを見いだすことにありと考えられる. というのは, 比視感度関数は単色光に対する視覚系の効率を測定したものであり, これを説明するための実験式やモデルを, 多くの異なる単色光成分を含む複合光に対してどのように拡張すべきかという点に関しては, まだ自由度が残っているのである.

たとえば, 単色光  $\lambda$  の場合はその物理的放射量が  $L_{e,\lambda}$  で与えられたとき, 視覚感に基づく評価量は, 対応するレベルの比視感度を  $S_\lambda$  とすれば,  $L_{e,\lambda} \cdot S_\lambda$  で与えられる. 次に, 二つの単色光  $\lambda_1, \lambda_2$  を重ね合わせた複合光について考えると, その放射量が  $L_{e,\lambda_1}, L_{e,\lambda_2}$  で与えられたときの評価量は, 対応するレベルの比視感度を  $S_{\lambda_1}, S_{\lambda_2}$  としたとき,  $L_{e,\lambda_1} \cdot S_{\lambda_1} + L_{e,\lambda_2} \cdot S_{\lambda_2}$  で与えられるかどうかは保障されていない. すなわち, 効率の加法性ということが問題となってくるのである.

本研究においては, 評価の基準となる視覚感として, 参照白色光との直接比較による明るさマッチング法を用い, 薄明視レベルにおいて, 2色混合時の効率の加法性を測定し, それらをもとに, 複合光に対しても適用可能な薄明視における明るさ知覚モデルを提案する. また, このモデルを, あらゆるレベルで人間の視覚に忠実に対応する光の量の評価システムに応用することを検討する.

## 2. 実験原理と装置

2色混合時の効率の加法性の研究は, ささまざまな視覚の効率に対して, すでに多くの研究がなされている(Ikeda<sup>9)</sup>, Boynton ら<sup>9)</sup>, Guth ら<sup>10)</sup>, Wagner ら<sup>11)</sup>, Kranda ら<sup>12)</sup>, Yaguchi ら<sup>13)</sup>, Ikeda<sup>14)</sup>). 実験原理はこれらのものと同じであるが, その概略を次に述べる.

対象となる視覚感は, 前に述べたように白色参照光との明るさマッチングという手法に基づく明るさ感覚である. そこでまず, 二つの単色光  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  を, ある網膜照度レベルの白色参照光と明るさマッチングを別々に行ない, このときの  $\lambda_1, \lambda_2$  の放射輝度を  $L_{e,1}, L_{e,2}$  とする. 次にこの二つの単色光を, ある放射輝度比で混合したものを, 同じ白色参照光と明るさマッチングし, このときの二つの成分  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の放射輝度を  $L_{e,1}, L_{e,2}$  とする. いろいろな放射輝度比で混合した色光について, 同様の測定を行なったとき, もし明るさの効率の加法則が成立するならば,  $L_{e,1}, L_{e,2}$  はある線形な式に従って変化する. これは,

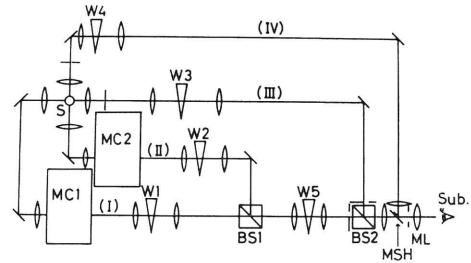


Fig. 1 Scheme of the apparatus.

$$L_{e,1}/L_{e,1}^\circ + L_{e,2}/L_{e,2}^\circ = 1 \quad (3)$$

と表わすことができる. いま  $\rho_1 = L_{e,1}/L_{e,1}^\circ$ ,  $\rho_2 = L_{e,2}/L_{e,2}^\circ$  と定義すると, 式(3)は  $\rho_1 + \rho_2 = 1$  となる. 一般には, 効率の加法則は成立するとは限らない. そこで,  $\rho_1 + \rho_2 > 1$  となる場合を効率減少型加法則不軌,  $\rho_1 + \rho_2 < 1$  となる場合を効率増大型加法則不軌と呼ぶことにする.

実験は上述のように, 単独の場合も含めて, 二つの単色光をいろいろな比で混合した色光を, 一定の白色参照光と明るさマッチングするというものである. このために用いた実験装置は, Fig. 1 に示すような4チャンネル・マックスウェル視光学系である. 光源 S は, 500 W のキセノンランプを用いた. 光路 I, II は, モノクロメータ MC1, MC2 により単色光を作り出す光路で, 円形濃度ウェッジ W1, W2 により混合比が調節され, ビームスプリッタ BS1 により混色されテスト光となる. 光路 III は, 参照用白色光を作り出す光路で, ウェッジ W3 により網膜照度が調節され, ビームスプリッタ BS2 により, テスト光と隣合せの垂直二分視野に合成される. 光路 IV は, 順応用白色光を作り出す光路で, ウェッジ W4 により網膜照度が調節され, ミラーの付いたシャッター MSH により, 垂直二分視野と交互に切り換えて呈示される. 順応視野を用いたのは, テスト光による色順応その他を取り除き, 順応状態を一定に保つためである. 参照用白色光と順応用白色の色度座標は,  $10^\circ$  視野等色関数を用いて計算すると, それぞれ  $x = 0.33$ ,  $y = 0.37$  および  $x = 0.32$ ,  $y = 0.37$  である.

被験者は, ウェッジ W5 を自ら動かして, テスト光の強度を調節し, 参照用白色光との明るさマッチングを行なう.

## 3. 実験条件

視野は, マッチング視野が  $10^\circ$  円形垂直二分視野で, 左半分は二つの単色光  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  を混色したテスト光, 右半分に白色参照光が呈示される. 順応視野は  $18^\circ$  円形

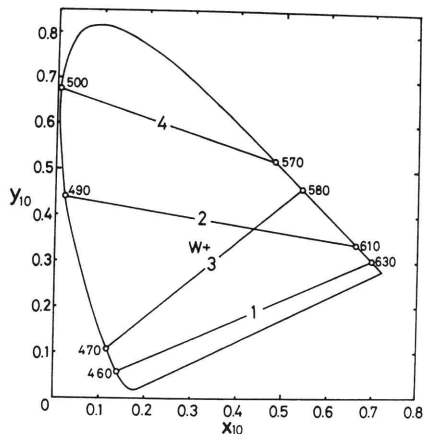


Fig. 2 Chromaticity coordinates of stimuli used for four monochromatic pairs.

視野で、マッチング視野と同じ位置に切り換えて呈示される。呈示時間は、マッチング視野が1秒、順応視野が2秒の繰返しである。

網膜照度レベルは、明所視から暗所視までのレベルをカバーするため、100, 10, 1, 0.1, 0.01 tdの5レベルを設定した。白色参照視野および白色順応視野が、これらのレベルに設定される。

混色する単色光  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の組合せは、

1.  $\lambda_1=460$  nm,  $\lambda_2=630$  nm
2.  $\lambda_1=490$  nm,  $\lambda_2=610$  nm
3.  $\lambda_1=470$  nm,  $\lambda_2=580$  nm
4.  $\lambda_1=500$  nm,  $\lambda_2=570$  nm

の4通りを選んだ。これらの組合せの色度座標を、Fig. 2に示す。

混色の際の混合比は、単独の場合を含めて9種類を設定した。混合比の設定は、まず予備実験で、 $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  単独呈示の場合の明るさマッチングを行ない、 $L_{e,1}$ ,  $L_{e,2}$  を求める。次に、 $\rho_1$ - $\rho_2$  空間で等角度間隔になるように、すなわち、 $\rho_2/\rho_1 = \tan(n\theta)$  となるように間の七つの混合比を設定する。この場合、混合比  $L_{e,2}/L_{e,1}$  は、 $(L_{e,2}/L_{e,1}) \tan(n\theta)$  ( $\theta = \pi/16$ ,  $n=1, 2, \dots, 7$ ) となる。本実験では、 $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  単独の場合も再び測定を行なうので、 $L_{e,1}$ ,  $L_{e,2}$  は予備実験の値から少し変化する場合もあり、したがって実験結果は必ずしも  $\rho_1$ - $\rho_2$  空間で等角度間隔とはなっていない。

1セッションは、一つの組合せについて、100→0.01 td, 0.01→100 td の5レベル×2回の測定から成る。網膜照度レベルを下げていくときは、次のレベルに移る前に、10分間の暗順応時間をおいた。明るさマッチングは、一つの呈示条件について3回行なう。全セッション

数は3ないし4であるので、1条件につき合計18ないし24回の明るさマッチングを行なうことになる。

被験者は、YN と CI の2名で、ともに色覚正常で、心理物理実験に慣れた24歳の男子である。

#### 4. 実験結果

Fig. 3 に被験者 YN のすべての実験結果を示す。横軸、縦軸は、前に定義した  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  である。黒丸は、18ないし24回のマッチングの平均値をデータ点として示し、点線は  $\rho_1 + \rho_2 = 1$  の直線、すなわち加法則が成立する場合の条件を示す。4段5列に配置したデータは、段が  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の組合せの違いを示し、列が網膜照度レベルの違いを示す。それぞれの条件は、右側および上段に示してある。Fig. 4 は、被験者 CI の同様の結果を示したもので、データ点は白丸で示してある。

まず明所視の100 tdの結果を見ると、被験者 YN の結果は、どの  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の組合せに対しても、データ点

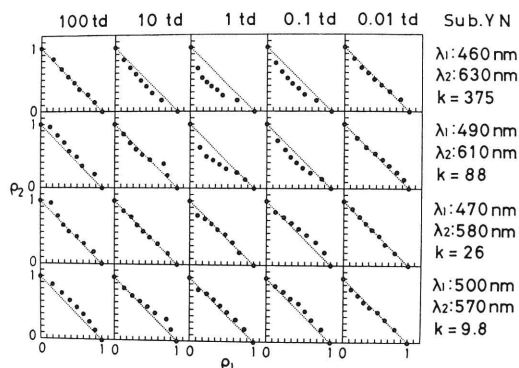


Fig. 3  $\rho_1$ - $\rho_2$  plots for five illuminance levels (columns), and for four pairs of  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  (rows). Dotted lines are for the additivity law. Conditions are indicated upside and right side of the figure. Subject YN.

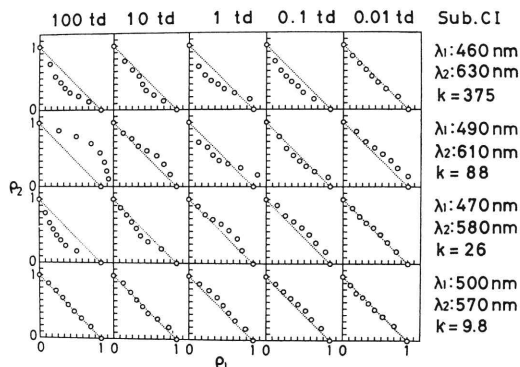


Fig. 4 Same as Fig. 3, but for subject CI.

は  $\rho_1 + \rho_2 = 1$  の直線付近に位置しており、明るさ感覚に対する効率の加法性がほぼ成立するような結果を示している。一方、被験者 CI の場合は、データ点は  $\rho_1 + \rho_2 = 1$  の直線から離れた所に位置し、明らかな加法則不軌を示している。その特徴は、2段目の  $\lambda_1 = 490 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 610 \text{ nm}$  の組合せの場合を見ると、データ点は点線の右上方に位置し、等しい明るさに保つためには、線形な足し合わせで予測されるよりも多くの光量を必要とすることを示している。すなわち、効率減少型の加法則不軌を生じている。直接比較法における明るさ感覚の効率の加法則不軌は、今日一般に認められており、その原因は明るさ感覚に対する反対色チャンネルの寄与にあるとされている (Guth ら<sup>15)</sup>, Yaguchi ら<sup>13)</sup>). いまの組合せの場合  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  は、赤-緑反対色チャンネルを刺激し、それぞれ単独で呈示した場合には、緑あるいは赤の色レスポンスが明るさ感覚に寄与している。ところがこの2色を重ね合わせると、緑と赤の色レスポンスがキャンセルするため、全体の色レスポンスは減少し、等明るさに保つためにはこれを補う分だけ光量が余計に必要となるのである。

また、1段目の  $\lambda_1 = 460 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 630 \text{ nm}$  および3段目の  $\lambda_1 = 470 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 580 \text{ nm}$  の組合せでは、データ点は点線の左下方に位置し、効率増大型の加法則不軌を示している。これまでの研究でも、組合せの一方に青色光が含まれている場合には、このような加法則不軌が生ずることが報告されている (Guth<sup>16)</sup>, Kaiser ら<sup>17)</sup>, Yaguchi ら<sup>13)</sup>). そして、Yaguchi ら<sup>13)</sup> は、その原因が反対色チャンネルの明るさへの寄与に対する非線形性にあることを示している。

以上のように、被験者 CI の明所視の結果は、これまでに報告された結果を確認するものであったが、被験者 YN で、顕著な加法則不軌が見られなかったのは、この被験者に関しては、明るさ感覚に対する反対色チャンネルの寄与が非常に小さく、主に輝度チャンネルの情報だけで明るさを判断しているためと解釈することができる。最近 Ikeda ら<sup>18)</sup> は、多くの被験者で明所視の明るさ比視感度関数および加法性を測定した結果、ある被験者は、はっきりとしたダブルピークを示す比視感度関数と大きな加法則不軌を示すのに対し、ある被験者は、一つのピークのみをもつ  $V(\lambda)$  型の比視感度関数と、加法則成立に近いデータを示すことを見いだした。これに関しては、Palmer<sup>19)</sup> も同様なことを指摘している。このような被験者間の相違は、反対色チャンネルの明るさ感覚への寄与の大きさが、被験者によって異なるために生

ずると解釈することができ、被験者 YN と CI の間にもこのような相違があるものと思われる。

次に、2列目の 10 td の結果を見ると、被験者 YN の結果は大きな変化は見られないが、CI の結果は加法則不軌の大きさが減少し、加法則成立に近づいてきているのが見られる。この CI の変化は、反対色チャンネルの寄与が輝度チャンネルの寄与と比べて相対的に減少するためと考えられる。このような現象は、明所視レベルでも、照度レベルが下がるとカラフルネス (colorfulness) が減少すること (Hunt<sup>20)</sup>), また 芦澤ら<sup>21)</sup> によっても、この付近のレベルで色のついた布地の明るさが、グレースケールと比べて相対的に減少することが報告されていることなどの事実と一致する。被験者 YN の場合は、反対色チャンネルの寄与がほとんどないと考えられるため、顕著な変化はないと予測される。

3, 4 列目の 1, 0.1 td の結果は薄明視レベルでのデータであるが、このレベルになると両被験者の傾向は一致してくるようになり、1, 2 段目の組合せではともに効率増大型の加法則不軌が見られる。また、3, 4 段目の組合せでは、ともにほぼ加法則成立か若干の効率減少型加法則不軌を生じているようである。

これらの網膜照度レベルでは、錐体と桿体がともに活動し、それらの応答が明るさ感覚に寄与していると考えられる。また実験に用いた四つの  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の組合せは、図の上段の組合せほど  $\lambda_1$  がおもに桿体を刺激し、 $\lambda_2$  がおもに錐体を刺激するという分離の効果が大きい組合せとなっている。図の右側に示した  $k$  の値は、この分離の効果の大きさを、錐対輝度チャンネルの分光効率  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  (CIE 1964 10° 視野等色関数) および桿体の分光効率  $V'(\lambda)$  から評価したもので、具体的には  $k = [V'(\lambda_1)/\bar{y}_{10}(\lambda_1)]/[V'(\lambda_2)/\bar{y}_{10}(\lambda_2)]$  という量である。したがって、 $k$  の値が大きい組合せに対して見られた効率増大型の加法則不軌は、錐体と桿体の相互作用によって生じていると推測される。薄明視レベルでのような型の加法則不軌は、最近 Crawford ら<sup>22)</sup> によっても報告されている。こうした現象に横たわる視覚系のメカニズムについては、後に詳しく考察することにする。

最後に、5列目の 0.01 td の結果を見ると、両被験者ともどの組合せについても、ほぼ加法則が成立する結果を示している。この網膜照度レベルは、ほぼ暗所視レベルと考えられ、したがって明るさ感覚は、ほとんど桿体の応答のみによって決まっていると考えられる。この場合、予測されることは、加法則の成立であり、実験結果はこの予測を支持するものとなっている。しかし、この

レベルでも長波長側の単色光は色が見えており、錐体の応答は完全になくなっていないとはいきれない。実際、赤-緑のキャンセレーションの生じる2段目の組合せで、被験者 CI において若干の効率減少型加法則不軌が見られるのは、錐体による反対色チャンネルの寄与がまだ残っているためと推測される。

### 5. 考 察

薄明視比視感度関数の変化を説明するためのモデルは、すでにいくつか提案されている。ここでは、これらのモデルのうち現在最もよく比視感度関数の変化を説明しているモデルとして、Ikeda-Shimozono のモデル<sup>3)</sup>を取り上げ、加法性のデータに応用し、これを改良することを試みる。

Ikeda-Shimozono のモデルは、次のように書き表わされる。

$$\log S_T(\lambda) = a \log S_R(\lambda) + b \log S_C(\lambda) + c \quad (4)$$

ここで、 $S_R$  は暗所視比視感度関数、 $S_C$  は明所視比視感度関数、 $S_T$  はこの中間のあらゆるレベルでの比視感度関数を表わす。係数  $a$  と  $b$  はそれぞれ桿体と錐体の寄与の大きさを表わす係数で、網膜照度レベルに従って変化する。 $a$  と  $b$  の間には、ほぼ  $a+b=1$  の関係が成り立っている。また定数  $c$  は、規格化の際に必要な補正項で、適当な規格化の下では  $c \approx 0$  となる。そこで、 $b=1-a$ 、 $c=0$  とおき、式(4)を加法性のデータに応用してみる。この際  $S_R$  は  $V'(\lambda)$ 、 $S_C$  は  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  を用いることにする。このように置き換え、とくに  $S_C$  を錐体輝度チャンネルの分光感度とすることは、厳密には正しくない。なぜなら、 $S_C$  には反対色チャンネルの寄与があるからである。しかし、被験者によっては、この寄与はきわめて少ない場合もあり、このような置き換えをして検討を進めることにより、基本的な錐体と桿体の相互作用を明らかにすることができると思われる。式(4)が複合光にも応用できるとすれば、上のような置換えとした後に、

$$\log L_m = a \log A' + (1-a) \log A \quad (5)$$

が得られる。ここで  $L_m$  は明るさ感覚にとって有効な光の量の評価値であり、 $A$  および  $A'$  は錐体および桿体輝度チャンネルに吸収される光の量で、次式で定義される。

$$A = K_a \int L_{e,\lambda} \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$$A' = K_a' \int L_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

ここで  $L_{e,\lambda}$  は、評価しようとする光の分光放射量を表

わす。式(5)の解釈は、まず第1に、錐体および桿体輝度チャンネルの応答は、吸収した光の量に線形に比例せず、対数的非線形性をもつということ。第2に、これらの非線形応答が、網膜照度レベルに応じて変化する係数により重みづけされて足し合わされ、最終的な明るさの応答となるということである。

式(5)を用いて、二つの単色光を混合したときの加法性を理論的に予測してみると、錐体と桿体を分離して刺激する組合せほど、薄明視レベルで大きな効率増大型加法則不軌を生ずるという定性的な性質は説明することができる。しかし、定量的に見ると、反対色チャンネルの寄与が非常に少ないと考えられる被験者 YN のデータと比べても、薄明視レベルでの効率増大型加法則不軌が大きく出すぎる傾向が見られる。そこで次に、式(5)を改良することを試みる。

式(5)における係数  $a$  は、網膜照度レベルが一定であれば一定の定数であるから、もし Palmer<sup>2)</sup> が用いた横軸に  $\log A'$ 、縦軸に  $\log A$  をとったグラフにデータをプロットした場合、等明るさの色光は、傾き  $-a/(1-a)$  の直線上に並ぶはずである。これが式(5)から予測される結果であるが、実際に本実験のすべてのデータを、この形式でプロットしたのが Fig. 5 である。この際測光上の理由から、データは 100 td における被験者 YN の 570 nm の  $A$  の値が 100 となるように規格化してある。上段は被験者 YN のデータを黒丸で、下段は CI のデータを白丸で示している。これを見ると、被験者 YN

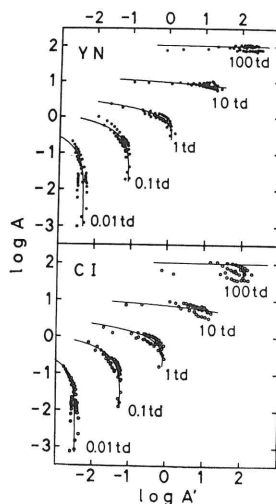


Fig. 5 Replots of results of Figs. 3 and 4 in the form,  $\log A' - \log A$  for the subject YN (filled circles), and for CI (open circles), and theoretical curves (continuous lines).

の 100 td のデータを除けば、どのデータも直線上にはなく、Palmer が得た結果と同様の曲線を描いている。その特徴は、長波長光の成分を多く含む色光群の傾きは小さく、短波長光の成分を多く含む色光群の傾きは大きくなっており、この間の変化は滑らかであるということである。これは、長波長側では錐体の寄与が大きくなり、短波長側では桿体の寄与が大きくなるということを表わしていると考えられる。最近、Sagawa ら<sup>4)</sup>は Ikeda-Shimozono のモデルと同様の式で薄明視比視感度関数を説明する際、その係数を 570 nm を境に、短波長側で桿体の寄与が大きくなり、長波長側で錐体の寄与が大きくなるよう、一つの網膜照度レベル内で二つの異なる値を採用すると、実験値と理論値の一致が非常によいことを報告している。

このような事実から、式(5)における係数  $a$  は、参照光の網膜照度レベルが一定であれば一定の定数になるのではなく、テスト光の種類によって変化すると考えたほうがよいことが示唆される。ここでは、さまざまな研究から得られた事実を踏まえた上で、このような関数として、次の式を提案する。

$$a = \sigma^{\alpha} / (\sigma^{\alpha} + A^{\alpha}) \quad (8)$$

$A$  は式(6)で定義される錐体輝度チャンネルに吸収される光の量で、 $\sigma$  と  $\alpha$  は  $a$  の形状を決めるパラメータである。 $a$  は桿体の寄与の大きさを表わす係数であり、プルキンエ移行の尺度となる量である。 $\sigma$  と  $\alpha$  は、このプルキンエ移行がどのくらいの光の強度レベルで起こるか、そして錐体系から桿体系への移行がレベルの変化に対してどれくらいの速さで起こるかを表わすパラメータとなっている。式(8)をメカニズムとして解釈すると、錐体と桿体の寄与の割合を決める視覚系のメカニズムにおいては、光の強度を錐体輝度チャンネルによって評価し、それぞれの寄与の割合をこの評価をもとに決定するということになる。錐体輝度チャンネルは、桿体輝度チャンネルに比べて長波長側で感度が良いので、長波長側では  $A$  の値が大きくなり、したがって  $a$  の値が小さくなる。すなわち、このとき、錐体の寄与が大きくなる。また逆に、短波長側では桿体の寄与が大きくなり、前に述べた係数  $a$  のテスト光による変化が自然に説明できるのである。

式(8)を式(5)に代入すると、

$$\log L_m = \frac{\sigma^{\alpha}}{\sigma^{\alpha} + A^{\alpha}} \log A' + \frac{A^{\alpha}}{\sigma^{\alpha} + A^{\alpha}} \log A \quad (9)$$

が得られる。これが本研究の提案する改良型薄明視モデルである。式(9)を用いて実験データを説明するために

は、式に含まれる未知のパラメータを決定しなければならない。この場合は  $\sigma$  と  $\alpha$ 、そして式(6)、(7)に含まれる  $K_a$ 、 $K_a'$  であるが、 $K_a$  または  $K_a'$  のどちらか一方は任意であるので  $K_a$  は明所視測光量に一致するように選び、これらの比  $\kappa = K_a' / K_a$  を未知のパラメータとする。

まず、Fig. 5 のデータを説明するように  $\sigma$ 、 $\alpha$ 、 $\kappa$  の値を決定することを考える。このデータは、式(9)において、 $L_m$  = 一定となるような  $A$  と  $A'$  の軌跡として説明される。 $L_m$  の値は、網膜照度レベルに従って変化する。そこで、 $\sigma$ 、 $\alpha$ 、 $\kappa$  は全レベルで共通に変化させ、 $L_m$  は各レベルに応じて変化させるような最小二乗法のプログラムを作り、これらのパラメータを決定した。この際 100 td のデータは、桿体の寄与はほとんど見られず、また被験者 CI の場合反対色チャンネルの寄与による直線からのずれが大きいため、最小二乗法によるフィッティングの対象からは除外した。

このようなフィッティングの結果求めたパラメータの値は、被験者 YN の場合、 $\sigma = 0.73$  td、 $\alpha = 1.07$ 、 $\kappa = 0.99$ 、CI の場合、 $\sigma = 0.65$  td、 $\alpha = 0.96$ 、 $\kappa = 1.00$  となった。これらのパラメータは、被験者による違いがあまり見られないので、共通の値として、 $\sigma = 0.7$  td、 $\alpha = 1$ 、 $\kappa = 1$  を採用することにする。このとき、式(9)は簡略化されて、

$$\log L_m = \frac{\sigma}{\sigma + A} \log A' + \frac{A}{\sigma + A} \log A \quad (10)$$

となる。ここで  $\sigma$  は、 $A$  や  $A'$  と同じ次元の量であり、 $A$ 、 $A'$  の次元を変えた場合はこれに応じて変化させなければならないので、直接数値は代入せず  $\sigma$  と表わしておく。また式(6)、(7)における  $K_a$ 、 $K_a'$  の間には、 $K_a = K_a'$  の関係が成り立つ。

Fig. 5 の実線は、採用したパラメータの値を用いて描いた式(10)による理論曲線である。100 td の曲線は、最小二乗法によるフィッティングではなく、 $L_m = 100$  としたときの曲線である。被験者 CI の明所視の条件を除けば、理論曲線はデータをよく説明しており、式(10)の妥当性を示している。被験者 CI の明所視の条件を説明できないのは、前に述べたとおり式(10)では反対色チャンネルの寄与が考慮されていないためである。

次に、Fig. 3, 4 の加法性のデータに式(10)を適用してみる。Fig. 6, 7 は、Fig. 3, 4 のデータの上に、上で決定したパラメータの値を用いて式(10)により求めた理論曲線を実線で描いたものである。この場合もやはり、被験者 CI の明所視の条件を除いて、理論曲線はデ

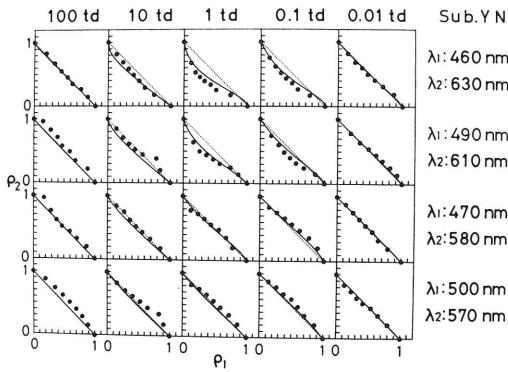


Fig. 6 Comparison between the data of Fig. 3 and the theoretical curves. Subject YN.

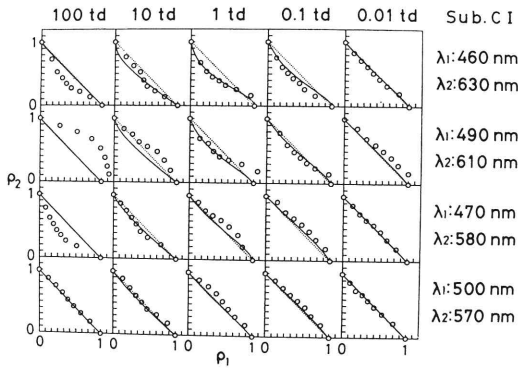


Fig. 7 Same as Fig. 6, but for subject CI.

ータをよく説明している。k の大きい組合せに対して、薄明視レベルで効率増大型加法則不軌を生ずる点、また k の小さい組合せに対しては、0.1 td のときに逆に若干効率減少型の加法則不軌を生ずる点などの複雑な変化も、よく予測できるようである。このように、加法性のデータとの比較からも式(10)の妥当性が示された。

以上のように式(10)は、多くの面で有益なモデルであると考えられるが、課題としては、反対色チャンネルの寄与を考慮していないことが上げられる。今後はこの点に関して検討していく必要があると思われるが、式(10)によって、基本的な明るさ感覚に対する錐体と桿体の相互作用が明らかになったと思われる。

### 6. おわりに

式(10)は、現在求められている薄明視における光の量の評価システムにも応用することができる。A および A' を測光量の L および L' に置き換える式と(10)は、

$$\log L_m = \frac{\sigma}{\sigma + L} \log L' + \frac{L}{\sigma + L} \log L \quad (11)$$

となる。ここで L, L' は、式(1), (2)で定義される明

所視および暗所視輝度である。式(1)では、 $\bar{q}_{10}(\lambda)$  ではなく  $V(\lambda)$  が用いられている。ここで式(6)ではなく、式(1)を用いた理由は、本研究では、視覚特性を説明するモデルとしての意味から  $\bar{q}_{10}(\lambda)$  を用いたが、光の量の評価システムとして見た場合には、現在の測光システムとの互換性から、 $V(\lambda)$  を用いるほうが利点が多いと考えられるためである。また式(2)における  $K_m'$  は、現在の測光システムでは、式(1)の  $K_m$  とは異なる値を採用しているが、本研究の結果から予測されることは、 $K_m' = K_m$  としたほうがより人間の視覚特性に忠実なシステムとなるであろうということである。新しく導入されなければならないパラメータは、 $\sigma = 0.7 \text{ td}$  という量であるが、評価システムとして用いるためには  $\text{cd}/\text{m}^2$  の単位に変換する必要がある。

人間の明るさ感覚に忠実な光の量の評価を行なうためには、明所視輝度 L と修正された暗所視輝度 L' から、式(11)により  $L_m$  を求めればよい。L ≫ σ となる明所視では、 $L_m = L$  となり、L ≪ σ となる暗所視では、 $L_m = L'$  となる。またこの中間のレベルでは、 $L_m$  の値は、L の値に応じて適当に重みづけされた L と L' の幾何平均となる。

人間の明るさ感覚に忠実な光の評価量という意味では、明所視輝度 L はあまり適当とはいえない。というのは、何度も述べたように、明所視の明るさ知覚には、多くの場合反対色チャンネルが寄与しているからである。この寄与を考慮した新しい明所視の光の量の評価システムの提案は、矢口ら<sup>23)</sup>によってなされている。今後は、こうした提案も考慮して、薄明視の評価システムを改良していく必要がある。

### 文 献

- 1) J. A. S. Kinney: "Comparison of scotopic, mesopic, and photopic spectral sensitivity curves," J. Opt. Soc. Am., **48** (1958) 185-190.
- 2) D. A. Palmer: "The definition of a standard observer for mesopic photometry," Vision Res., **7** (1967) 619-628.
- 3) M. Ikeda and H. Shimozono: "Mesopic luminous-efficiency functions," J. Opt. Soc. Am., **71** (1981) 280-284.
- 4) K. Sagawa and K. Takeichi: "Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range," J. Opt. Soc. Am., **A3** (1986) 71-75.
- 5) D. A. Palmer: "Standard observer for large-field photometry at any level," J. Opt. Soc. Am., **58** (1968) 1296-1299.
- 6) D. A. Palmer: "Rod-cone mechanism underlying the Purkinje shift," Nature, **262** (1976) 601-603.
- 7) S. Kokoschka and H. W. Bodmann: "Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbeurteilung im gesamten Adaptationsbereich," CIE

- Publ., No. 36 (1976) 217-225.
- 8) M. Ikeda: "Study of interaction between mechanisms at threshold," *J. Opt. Soc. Am.*, **53** (1963) 1305-1313.
  - 9) R. M. Boynton, M. Ikeda and W. S. Stiles: "Interactions among chromatic mechanisms as inferred from positive and negative increment thresholds," *Vision Res.*, **4** (1964) 87-117.
  - 10) S. L. Guth, N. J. Donley and R. T. Marrocco: "On luminance additivity and related topics," *Vision Res.*, **9** (1969) 537-575.
  - 11) G. Wagner and R. M. Boynton: "Comparison of four methods of heterochromatic photometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **62** (1972) 1508-1515.
  - 12) K. Kranda and P. E. King-Smith: "Detection of coloured stimuli by independent linear systems," *Vision Res.*, **19** (1979) 733-745.
  - 13) H. Yaguchi and M. Ikeda: "Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching," *Vision Res.*, **23** (1983) 1711-1718.
  - 14) M. Ikeda: "Linearity law reexamined for flicker photometry by the summation-index method," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 1055-1061.
  - 15) S. L. Guth and H. R. Lodge: "Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new model," *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 450-462.
  - 16) S. L. Guth: "Photometric and colorimetric additivity at various intensities," *AIC Proc. Color* **69** (1970) pp. 172-180.
  - 17) P. K. Kaiser and G. Wyszecki: "Additivity failures in heterochromatic brightness matching," *Color Res. Appl.*, **3** (1978) 177-182.
  - 18) M. Ikeda and Y. Nakano: "Stiles summation index applied to heterochromatic brightness matching," *Perception* (1986) in press.
  - 19) D. A. Palmer: "Visibility curves by direct comparison in a 10° field at 1000 Td," *J. Opt. Soc. Am.*, **A 2** (1985) 578-583.
  - 20) R. W. G. Hunt: "The specification of colour appearance. II. Effects of changes in viewing conditions," *Color Res. Appl.*, **2** (1977) 109-120.
  - 21) 芦澤昌子, 池田光男, 中野靖久: "照度レベルによる色布地の明るさ変化の実験と解析," *照明学会誌* **69** (1985) 274-280.
  - 22) B. H. Crawford and D. A. Palmer: "The scotopic visibility curve and cone intrusion," *Vision Res.*, **25** (1985) 863-866.
  - 23) 矢口博久, 池田光男: "明るさ評価のための測光システム," *光学* **13** (1984) 140-145.