

# 解 説

## 比視感度と測光システム

佐 川 賢

製品科学研究所人間工学部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1-4

(1984年4月17日受理)

### Luminous Efficiency Functions and Photometric System

Ken SAGAWA

Human Factors Engineering Division, Industrial Products Research Institute,  
1-1-4, Yatabe-machi Higashi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305

#### 1. はじめに

人間の視覚系はおよそ 400~700 nm の波長の光に対して応答する一つの光検出器である。比視感度はその検出器の波長に対する応答特性であり、この特性を知ることは視覚研究者にとって最も基本的な興味の一つである。視覚のメカニズムを考える上で比視感度はこれまで重要な手がかりとなり、種々の方法で測定された眼の感度曲線はさまざまな視覚の特性を反映するものとして、視覚の解明に主たる役割を果してきた。また比視感度は視覚の解明のみならず応用の面から見ても重要である。測光という視覚に基づく光の評価、計測の分野では、比視感度は最も重要な基盤となる視覚特性であり、すでに国際規格として照明工学のあらゆる分野で利用されているものもある。

周知のように視覚系は精巧なメカニズムをもち、さまざまな視環境に対応して適切に働いている。比視感度も当然のことながら種々の条件によって変化する。ところが現在の測光システムではこうした比視感度の変化はほとんど考慮されておらず、今日のような複雑な視環境に適切に対応しているとはいいくらい。測光をそれぞれの視環境に応じた適応性のあるものとし、かつ視覚的意味をもたせるためにも、比視感度とその視覚メカニズムを詳細に検討することは重要である。ここでは比視感度と測光システムに関する研究の現状とその問題点を、とくに測光分野で重要な明るさ感覚を中心として解説する。

#### 2. 標準比視感度 $V(\lambda)$ , $V'(\lambda)$ と輝度

国際照明委員会 (CIE) は 1924 年、明所視における標準的な人間の眼の比視感度  $V(\lambda)$  を定め、これを照明工学で用いるよう勧告した。図 1 の白丸に示すように  $V(\lambda)$  は 555 nm にピークをもち、短波長および長波長側へいくにつれて徐々に低下する滑らかな釣鐘状の形をしている。この標準比視感度はいくつかの研究結果によるおよそ 50~100 名の観測者の平均値であるが、その基本となる測定法は交照法 (flicker photometry) と呼ばれる手法である。この方法は時間的に入れ替わる二つの光、すなわち参照光とテスト光を視野の同じ位置に与え、テスト光の光量を調節して視野のちらつきが最小となる点を求める方法である。テスト光が参照光に比べ明るすぎても、また暗すぎてもちらつきは残り、両者がほぼ等しい明るさのとき、ちらつきは最小となるかあるいは消滅する。参照光を一定にしてテスト光の波長を変えて測定すれば各波長に対する光の効率、すなわち比視感度が得られる。視野の大きさは視角にして 2° が用いられた。この方法は観測者の判定も比較的容易でデータも安定して求められ、標準的データを求めるには当時最も適当な方法と考えられていた。

CIE は  $V(\lambda)$  の確立とともに、これを用いて光源や物体の明るさを評価するため輝度 (luminance)  $L$  を次のように定義した。

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

ここで  $L_{e,\lambda}$  は光源や物体の分光放射輝度 ( $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ )、

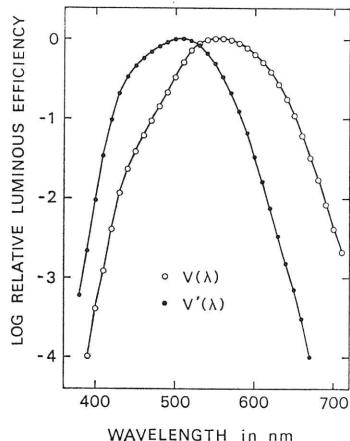


図 1 明所視の標準比視感度  $V(\lambda)$  と暗所視の標準比視感度  $V'(\lambda)$

$K_m$  は最大視感度と呼ばれる定数である。つまり輝度  $L$  は物体の分光放射輝度に視覚系の比視感度  $V(\lambda)$  の重みをつけて可視域全体に加え合わせた量として定義される。現在この輝度  $L$  は光源や物体の明るさを評価する尺度として照明工学のあらゆる分野で使用される重要なものとなっている。

明所視の標準比視感度の決定に続いて CIE は 1951 年暗所視に対しても同様に標準比視感度を制定した。これは視覚系の働く最も暗いレベル、たとえば星明かりのようなところでは視覚系の感度は明所視とは大きく異なるからである。図 1 の黒丸は暗所視の標準比視感度  $V'(\lambda)$  であり、 $V(\lambda)$  に比べ全体的に短波長側へ移行しピークは 505 nm となっている。明所視の  $V(\lambda)$  は視覚系の錐体の応答を表わすのに対し、 $V'(\lambda)$  は桿体の応答を示すと考えられている。 $V'(\lambda)$  に対しても(1)式と同様な式で暗所視の輝度  $L'$  が定義されており、非常に暗いレベルでの光の評価にはこの  $L'$  を用いることが勧められている。しかし実際には暗所視のレベルは非常に暗すぎて、実用的にはあまり用いられていないのが現状である。

### 3. 明るさ感覚の比視感度 $V_b(\lambda)$

光源や物体の明るさを評価するために決められた輝度  $L$  が種々の物体を人間が実際に見たときの明るさ感覚 (brightness) を忠実に反映していれば問題はないのであるが、実際はそうではないことが明らかとなってきた。LED やレーザーのように特定の波長にエネルギーの集中する光源や、カラーディスプレイの発光体のように比較的狭帯域の分光成分をもった彩度の高い色光などでは、輝度と明るさ感覚の違いは非常に大きいことが指摘

されている。たとえばカラーディスプレイ上で白色と青色の面を等輝度に合わせたとしても両者は決して同じ明るさには見えない。青色の面がはるかに明るく見える。こうした矛盾は種々のカラーディスプレイや三波長域発光型蛍光ランプのように特殊な分光組成をもつ光源が開発されると、その開発や評価の問題として注目されるようになった。

輝度と明るさ感覚が異なる原因としては前述の標準比視感度  $V(\lambda)$  が明るさ感覚に対する比視感度となっていないことがまず考えられる。事実  $V(\lambda)$  は主として交照法で測定されており、時間的なちらつき感に対する視覚の特性を表わしていると考えられる。この  $V(\lambda)$  を明るさ感覚の比視感度とはいがたい。明るさ感覚に対する比視感度がどのようなものかを検討する必要がでてきた。

明るさ感覚の比視感度を求める方法で最も適切とされているのが直接比較法 (direct brightness matching) である。この方法は適當な大きさの円形の視野を中心で 2 分し、一方を参照光、他方をテスト光とし、テスト光の光量を調節して両者が同じ明るさに見えるようにする。このマッチングに要したテスト光のエネルギーを各波長について求めると分光効率つまり比視感度が得られる。この方法は本来の見えの明るさを直接比較しているところから、他の交照法などに比べ視覚系の明るさ感覚を忠実に反映するものとされている。

直接比較法による比視感度のデータは  $2^\circ$  視野に対するものがすでにいくつか報告されている。CIE の技術

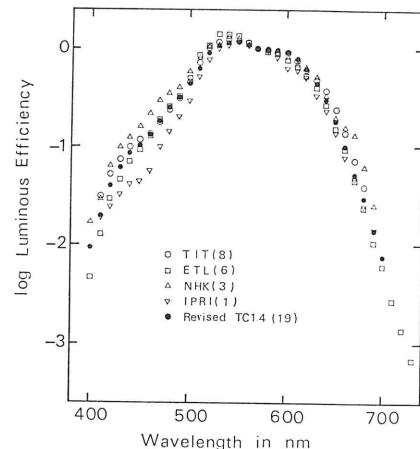


図 2 直接比較法による比視感度の測定例  
東工大 (TIT), 電総研 (ETL), NHK 基礎研 (NHK), 製科研 (IPRI), Revised TC 1.4 の五つの研究グループの結果。( ) は観測者数

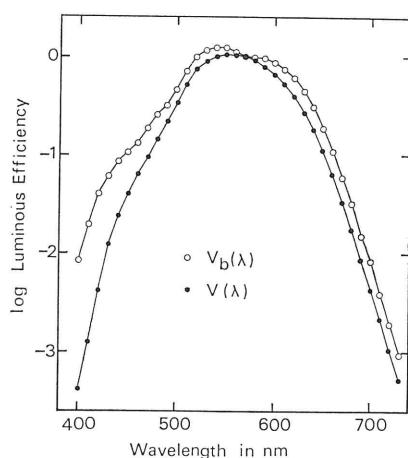


図3 明るさ感覚の比視感度  $V_b(\lambda)$  と標準比視感度  $V(\lambda)$

報告<sup>1)</sup>には米国を中心とした七つの研究グループの結果がまとめられているが、このなかにはまとめて平均化するには不適当な結果があり、それらを除いて Ikeda ら<sup>2)</sup>が修正したデータ (Revised TC 1.4) がある。図2にそれを黒丸で示した。このほかに日本でもいくつかの研究グループによる測定結果 (東工大<sup>3,4)</sup>、電総研<sup>5)</sup>、製科研<sup>6)</sup>、NHK<sup>7)</sup> があり、図2にそれらも同時に示した。データはすべて 570 nm で規格化されている。直接比較法による比視感度曲線はどの測定結果を見てもおよそ 530 nm と 610 nm にふくらみをもつ形となり、図1の  $V(\lambda)$  よりやや凹凸のある形となっている。また日本人と外国人の結果に有意な差は見られない。そこで図2全体の加重平均をとったものが図3の白丸である<sup>2)</sup>。観測者の総数は 37 名となり、現在のところこのデータが明るさ感覚の比視感度  $V_b(\lambda)$  として最も信頼できるものといえよう。比較のため CIE の標準比視感度  $V(\lambda)$  を黒丸で示した。明らかに、明るさ感覚の比視感度  $V_b(\lambda)$  は  $V(\lambda)$  とは大きく異なる。 $V(\lambda)$  に基づく輝度  $L$  が物体を見たときの明るさ感覚を正しく表現していない最大の理由はこの両者の比視感度の差異にあるといえる。したがって明るさ感覚に基づく測光システムを確立するためには  $V(\lambda)$  と同様に新たに  $V_b(\lambda)$  を標準化する必要がある。現在 CIE の比視感度技術委員会においてこのための作業が進められているが、ここに示した  $V_b(\lambda)$  はその最も基本となるデータといえよう。

表1に  $V_b(\lambda)$  の 10 nm ごとの数値 (対数値) を示しておいた。また表1には  $V(\lambda)$  との相対的な比 (570 nm で 1.0 に規格化) を示したが、この比は輝度をもとにして単色光の明るさ感を評価する場合に有用となる。たと

えば等しい輝度  $L$  をもつ 550 nm と 650 nm の色光のどちらが明るく見えるかを評価する場合、おのおのの輝度にこの比をかけると明るさ感覚に対する光の量が求められる。550 nm に対しては  $1.18L$ 、650 nm に対しては  $1.66L$  の値が得られ、おのおのの値を比較して 650 nm のほうが明るいと判定できる。また 550 nm の色光の輝度が  $L_{550}$  のとき、650 nm の色光の明るさをこれに一致させるためにはどのくらいの輝度が必要かを知る場合には、両者の明るさ感覚に対する光の量を一致させればよいので

$$L_{650} \cdot 1.66 = L_{550} \cdot 1.18$$

より

$$L_{650} = 0.71 \cdot L_{550}$$

表1 明るさ感覚の比視感度  $V_b(\lambda)$  の値 (対数値) と  $V(\lambda)$  との比

$\lambda$ (nm)	$\log V_b(\lambda)$	$V_b(\lambda)/V(\lambda)$
400	-2.07	20.5
410	-1.71	15.3
420	-1.40	9.48
430	-1.22	4.94
440	-1.07	3.52
450	-0.98	2.62
460	-0.88	2.09
470	-0.73	1.95
480	-0.60	1.85
490	-0.50	1.45
500	-0.34	1.35
510	-0.15	1.34
520	-0.01	1.31
530	+0.06	1.27
540	+0.09	1.23
550	+0.09	1.18
560	+0.05	1.07
570	0.00	1.00
580	-0.01	1.07
590	-0.02	1.20
600	-0.06	1.32
610	-0.13	1.40
620	-0.22	1.51
630	-0.35	1.60
640	-0.51	1.68
650	-0.73	1.66
660	-0.97	1.67
670	-1.23	1.75
680	-1.50	1.77
690	-1.83	1.71
700	-2.08	1.93

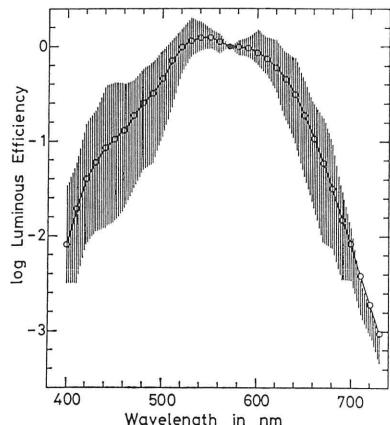


図 4 明るさ感覚の比視感度のばらつき<sup>2)</sup>  
(○)は  $V_b(\lambda)$

となり 650nm の輝度は 550nm の輝度の 0.71 倍でよいことがわかる。こうして表 1 をもとに単色光の輝度を知ればその明るさ感覚の評価が可能となる。また物理的な放射輝度が与えられている場合は  $V_b(\lambda)$  そのものをかけた値を用いて明るさ感覚の評価を行なえばよい。ただし現在の測光システムではあくまで一定の明るさ感覚をひき起こす光の量を問題にしており、 $V_b(\lambda)$  をかけた値が 2 倍であるから 2 倍の明るさ感覚を意味するわけではなく、たんに明るいと評価されるにすぎないことを注意しておく。明るさ感覚そのものの尺度化はまだ確立されておらず今後の課題である。

明るさ感覚の比視感度と測光システムに関する問題点を二つあげておく。その一つは観測者間のデータのばらつきである。図 4 は  $V_b(\lambda)$  のもとになった各観測者のデータのばらつきを示したものである<sup>2)</sup>。細い縦線で示した領域はデータの最大と最小を結んだ範囲で、これを見てわかるように個人差はかなり大きい。とくに短波長領域では 1 log unit にも及ぶところがあり、観測者によっては比視感度は 10 倍も異なることを示す。こうしたばらつきがいかなる視覚のメカニズムで起こるのかは現在のところほとんど解明されていない。最終的に明るさ感覚の標準データを確立する場合、この問題は無視できないものとなろう。しかしこれだけのばらつきはあっても、適当な数のグループ間の平均どうしは非常によく一致しているので標準的な  $V_b(\lambda)$  を議論する限りその値は安定したものであり、測光システムではそれに応じた精度が要求されることを付け加えておく。

もう一つの重要な问题是明るさ感覚の加法性の問題である。輝度を計算するための(1)式は各分光放射輝度成分に  $V(\lambda)$  をかけて足し合わせることができるこ

とを意味している。ところが明るさ感覚に対しては加法則が成り立たないことが最近の研究で明らかとなってきた (Guth ら<sup>8)</sup>, Yaguchi ら<sup>9)</sup>)。したがって(1)式の  $V(\lambda)$  をすぐ  $V_b(\lambda)$  に置き換えて計算するわけにはいかない。(1)式にかわる新しい方式を確立しなければ任意の複合光の明るさ感覚は評価できない。この問題はかなり複雑な問題であり、これを解決するためには明るさ感覚がどのようなメカニズムで形成されるかという視覚や色覚そのものの問題に立ち入らざるを得ない。

現在の色覚メカニズムの考え方では、視覚系の経路に輝度チャンネルと色チャンネルがあり、これらの出力とともに明るさ感覚に寄与していると考えられている。前述の交照法による  $V(\lambda)$  は輝度チャンネルの出力と考えられているが、明るさ感覚の場合はさらに色チャンネルの寄与が加わるので複雑な応答となる。色チャンネルには赤/緑、黄/青の二つの反対色チャンネルがあって、このチャンネルの出力は同じ色みの成分に対しては足し合われられるが、たとえば赤と緑のように相反する二つの成分に対しては相殺され出力は小さくなり、したがって明るさ感覚に対する寄与が小さくなる。これが加法性の失われる主たる原因と考えられている。

こうした輝度、赤/緑、黄/青の三つのチャンネルを用いて明るさ感覚を表わす視覚モデルとしては次式に示す Guth ら<sup>8)</sup> のベクトルモデルや Yaguchi ら<sup>9)</sup> の非線形ベクトルモデルが提案されている。

$$L_b = (A^2 + T^2 + D^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$L_b = (A^2 + T^{2p} + D^{2q})^{1/2} \quad (3)$$

ここで  $A$ ,  $T$ ,  $D$  はそれぞれ輝度、赤/緑、黄/青の各チャンネルの出力で実際には 3 種の錐体の分光感度かまた

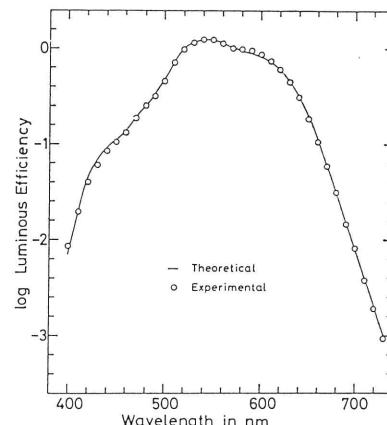


図 5 Yaguchi らのモデルによる明るさ感覚の理論的比視感度と実測値<sup>2,10)</sup>

は測色学における等色関数から導かれる。 $L_b$  は求めるべき明るさ感覚である。また(3)式の  $p, q$  は色チャンネルの非線形性を示す値で 1 以下 ( $p=0.64, q=0.36$ ) となっている。(2), (3)式とも基本的に明るさ感覚が、輝度、赤/緑、黄/青の三つの出力のベクトル和として表わされることを示している。

錐体の分光感度や等色関数が与えられれば(2), (3)式を用いて単色光に対する理論的な明るさ感覚  $L_b$  が求められ、これを実測値の  $V_b(\lambda)$  と比較することができる。一例として図 5 に(3)式の Yaguchi らのモデルによる理論と実測の比較を示す<sup>2,10)</sup>。実線は(3)式より計算された理論的な比視感度であり、白丸は図 3 に示された  $V_b(\lambda)$  である。両者はよく一致していて、少なくとも単色光に関する限りこうしたモデルが有効であることを示している。しかし一般の複合光に対してはまだ実測データも少なく、またこの他にも種々のモデルが提案されているので、視覚モデルについては今後詳細な検討が必要である。測光システムの当面の最も重要な課題である。

#### 4. $10^\circ$ 視野および小視野の明るさ感覚の比視感度

比視感度は視野の大きさによっても変化する。前述したように  $V_b(\lambda)$  は  $2^\circ$  視野に対するものであり、人間の視角が  $180^\circ$  以上という広い視野であることを考えると  $2^\circ$  は非常に狭い範囲である。日常生活では広い視野を見ることも多く測光システムを開発する上で大視野の比視感度も重要である。一方、道路、航空、船舶などの

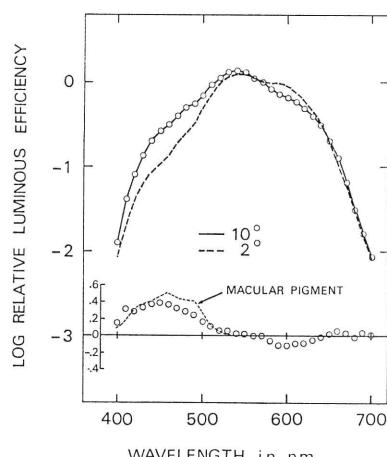


図 6  $10^\circ$  視野と  $2^\circ$  視野の明るさ感覚の比視感度  
挿入図:  $10^\circ$  と  $2^\circ$  の比視感度の差と黄斑色素の分光濃度<sup>11,12)</sup>

交通信号灯や標識は  $2^\circ$  視野よりもさらに狭く、ほとんど点光源として見ることが多い。こうした小視野でも比視感度は変化するので、小視野に対する比視感度を求めることが実用上重要である。

大視野として標準的に用いられるのが  $10^\circ$  視野であり、これ以上の広さでは比視感度はもはや大きな変化はない。 $10^\circ$  視野の明るさ感覚の比視感度に関してはまだ検討が不十分でデータの数も少ないが、Ikeda ら<sup>2)</sup> がまとめた9名のデータと筆者ら<sup>11,12)</sup>による12名のデータがある。図 6 の白丸は筆者らによる12名の平均データである。比較のため  $2^\circ$  視野の  $V_b(\lambda)$  を破線で示す。 $10^\circ$  と  $2^\circ$  のデータを比べると、中、長波長領域ではよく一致しているが 500nm 以下の短波長領域では  $10^\circ$  視野のほうが感度が上昇している。すなわち視野が広くなると、青色に対する感度がよくなる。この差はおもに網膜の中心に存在する黄斑色素 (macular pigment) によるものと考えられ、 $10^\circ$  視野では黄斑色素による光の吸収の影響が少くなり、その結果視感度の上昇が見られるのである。実際  $10^\circ$  と  $2^\circ$  の感度差を求め (図 6 挿入図の白丸), Wyszecki ら<sup>13)</sup> による黄斑色素の吸収特性 (挿入図の破線) と比較してみるとほぼ一致する。しかし詳細な比較をすると 450~500nm で依然有意な差は残るので、黄斑色素のみの影響ともいえず、 $10^\circ$  と  $2^\circ$  の差の要因についてはまだ検討を要する。

小視野の比視感度については Ikeda ら<sup>14)</sup> の詳細な検討がある。彼らのまとめた小視野比視感度の測定結果が図 7 に示されている。ここには  $10'$  以下の視野に対して、交照法、直接比較法、閾値法の三つの方法によって測定された六つの研究結果が示されている。いずれの結

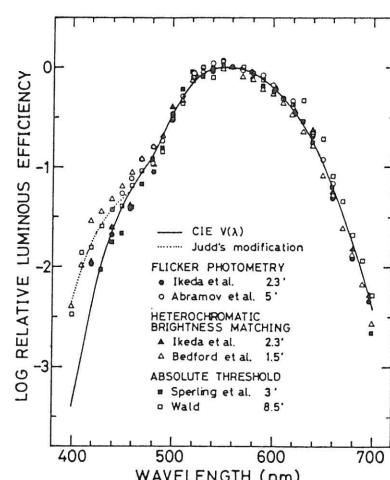


図 7 小視野の比視感度<sup>13)</sup>

果も全体的に滑らかな鉤鐘状の形を示し、CIE  $V(\lambda)$  (図の直線) や Judd 修正の  $V(\lambda)$  (図の点線) と非常によく一致する。小視野に対しては測定法による差は見られず、どの方法でも  $V(\lambda)$  と一致した比視感度が得られる。Ikeda らはこの点を強調し、小視野の比視感度は新たに確立しなくても  $V(\lambda)$  で十分代用できることを報告している。このことは測光システムにおいて大きな利点であり、現在の  $V(\lambda)$  に基づくシステムがそのまま小視野に対して適用可能であることを示している。

### 5. 薄明視の比視感度

比視感度に影響を及ぼすもう一つの重要な要因は視覚系の働く明るさのレベルである。これまで議論した  $V(\lambda)$  や  $V_b(\lambda)$  は明所視、すなわち昼間の明るいレベルでの感度特性であった。しかし夕暮れや夜になると、いわゆる「ブルキンエ現象」と呼ばれる感度変化が起こり、相対的に短波長成分に対する感度が上昇し、逆に長波長域では低下する。CIE はこのことを考慮し、前述したように  $V(\lambda)$  に統いて視覚系の最も暗いレベルである暗所視の標準比視感度  $V'(\lambda)$  を定めた。しかし明所視と暗所視の中間の薄明視レベルでは比視感度も測光システムもまだ確立されていない。薄明視では視覚系の桿体と錐体が同時に働くため視覚系全体が複雑な応答を示し、このことが薄明視の測光システムの確立を遅らせた原因の一つといえる。照明工学が発達すると夜間の道路、工事現場、公園など人工照明下での薄明視の視環境はますます多くなり、ここでの光の評価、計測はとくに重要

となっている。

薄明視の比視感度についてはこれまで Kinney<sup>15)</sup>、Kokoschka<sup>16)</sup>、Ikeda ら<sup>17)</sup>、Fuwa ら<sup>18)</sup>、筆者ら<sup>10,11)</sup>が報告している。このなかで筆者らのものが観測者の数、測定点の数が最も多く、標準データに最も近いと思われる所以図 8 にそれを示す。ここでは網膜照度にして 100~0.01 td の間の九つのレベルについて、10° 視野の直接比較法で測定された 12 名の平均比視感度が示されている。いちばん下の曲線は 100 td のレベルに対するもので、これは明所視の明るさ感覚の比視感度に対応する。上の曲線にいくにつれ明るさのレベルが低下し、薄明視、暗所視の領域へと移行するものであるが、相対的に短波長領域の感度が上昇していく。いわゆる「ブルキンエ現象」である。いちばん上の 0.01 td の曲線はすでに暗所視の領域であり、長波長端を除けば  $V'(\lambda)$  とほぼ一致する。この図でわかるように、薄明視では明るさレベルとともに比視感度は徐々に変化し、どれ一つとして同じ感度曲線は見あたらない。したがって薄明視の標準的な比視感度を確立する場合、できる限り細かいステップで実験データを求めるか、あるいは明所視から暗所視への感度変化を予測する実験式や視覚モデルを見いだすという方法が考えられる。いずれにしても現在のところデータが不足しているので、今後さらに定量的な検討を進めて実験データを整備することが必要である。

薄明視に関する最大の難問は測光システムの開発である。薄明視における測光も明るさ感覚を基盤としているので当然のことながら加法性が成り立たない。つまり(1)式のような積分式は使えない。さらに薄明視では、(2)、(3)式のような錐体のみのモデルに加えて、桿体の介入があるので、この間の相互作用を考えなくてはならない。とくに、薄明視における加法性の問題に関してはほとんどデータは報告されておらず、また桿体と錐体の相互作用についても多種多様なデータがあるばかりで結論は出ていない。

これまで薄明視の測光システムに関しては以下の三つの式が提案されている。

$$L_{eq} = (MS + P^2)/(M + P) \quad (4)$$

$$L_{eq} = [(X_{10}/Y_{10})F_X + F_Y + (Z_{10}/Y_{10})F_Z + (S/L_{10})F_S] L_{10} \quad (5)$$

$$\log S_T(\lambda) = a \cdot \log S_R(\lambda) + b \cdot \log S_C(\lambda) + c \quad (6)$$

(4)式は Palmer<sup>19)</sup> のモデルで  $S, P$  はそれぞれ明所視および暗所視の輝度であり、 $M$  は観測条件によって変化するパラメータである。 $L_{eq}$  が求めるべき薄明視に

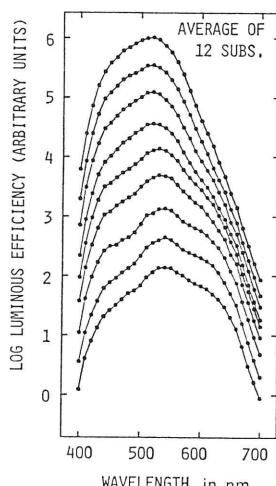


図 8 薄明視の比視感度

下から順に 100, 32, 10, 3.2, 1, 0.32, 0.1, 0.032, 0.01 td の網膜照度レベル<sup>11,12)</sup>

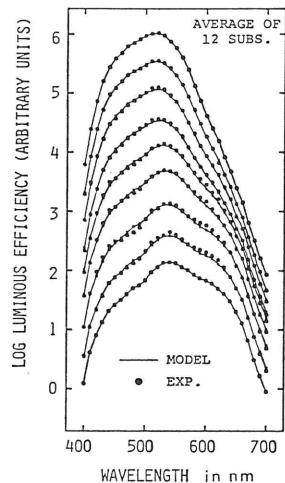


図 9 筆者らのモデルによる薄明視の理論的比視感度と実測値<sup>21)</sup>

における輝度であるが、これが明所視と暗所視の輝度の非線形な式で表わされている。(5)式は Kokoschka ら<sup>20)</sup>のモデルであるが、ここでは  $L_{eq}$  が三つの錐体と一つの桿体の合計四つの出力の線形な式で表わされている。 $X_{10}, Y_{10}, Z_{10}$  は測色学における  $10^\circ$  視野の 3 刺激値、 $L_{10}$  は明所視の  $10^\circ$  視野に対する輝度、 $S$  は暗所視の輝度である。 $F_x, F_y, F_z, F_s$  は明るさレベルによって変化する係数となっている。(6)式は Ikeda ら<sup>17)</sup>の比視感度に関するモデルで、薄明視の比視感度  $S_T(\lambda)$  が暗所視の比視感度  $S_R(\lambda)$  と明所視の比視感度  $S_C(\lambda)$  の対数による一次線形の式で表わされ、 $a, b, c$  は明るさのレベルで変化する係数である。この式の特徴は  $S_R(\lambda), S_C(\lambda)$  として明るさ感覚の比視感度を適用していることで、たとえば明所視でいえば  $V(\lambda)$  ではなく  $V_b(\lambda)$  を用いている。この点で(6)式は他の(4), (5)式と基本的に異なる。

これらのモデルを比較してみると、(4)式の Palmer のものは式が単純で測光システムへの応用が容易であるという利点をもつが、逆に実験データとのずれが大きいという欠点をもつ。(5)式の Kokoschka らのモデルはその後あまり検討されておらず、四つの成分の線形式が適當かどうかの疑問が残る。実験データとの一致が最もよいのは(6)式の Ikeda らのモデルで、これは明所視から暗所視までをすべて明るさ感覚の感度で統一的に扱うことの妥当性を示しているといえよう。Ikeda らの式に関しては、その後、筆者ら<sup>21)</sup>が改良した次の式がある。

$$\log S_T(\lambda) = a \cdot \log S_R(\lambda) + (1-a) \log S_C(\lambda) \quad (7)$$

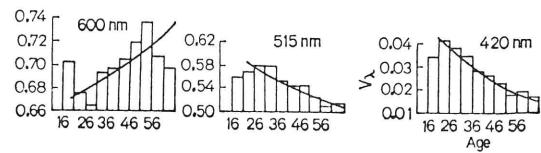


図 10 比視感度の年齢による変化  
560 nm で 1.0 に規格化したときの 600, 515, 420 nm の感度変化<sup>24)</sup>

この(7)式も実測データをよく説明しており、さらに測光システムへの応用が容易な形となっている。図 9 に筆者らの式による理論値と実験値の比較を示す。理論（黒丸）と実測（実線）との一致は非常によいことがわかる。ただし(6), (7)式とも現在のところ単色光に対するモデルなので、一般の複合光に対してどのように適用されるかは今後の課題である。

以上のように薄明視に関する測光モデルは現在いくつか提案されているが、どれも詳細な検討は今後に残されている。そのためにも、薄明視における加法性の検討や、一般の複合光の明るさ感覚などに対する実験的検討が要望されている。

## 6. 年齢の影響

比視感度は年齢とともに変化する。この原因はおもに水晶体や硝子体という眼球光学系の透過率が年とともに低下するためといわれている。その結果、レンズ系の吸収がとくに多い短波長域での感度が低下する。この問題に関するデータはあまり蓄積されていないが、一例をあげれば Ruddock<sup>22)</sup>の研究がある。これは六つの波長 (420, 460, 515, 530, 560, 600nm) を用いて 560nm に対する相対的な感度が年齢とともにどのように変化するかを 16~70 歳の約 400 名の観測者について検討したものである。図 10 はその結果の一部で、三つの波長 (420, 515, 600nm) について各年齢グループ別の平均比視感度が示されている。相対的 (560nm で規格化) に見て、600 nm では年齢とともに感度はやや上昇するものの、短波長域の 420, 515 nm では年齢とともにかなり低下していく。このほかにも、Werner<sup>23)</sup>が暗所視の比視感度について年齢とともに短波長域の感度が低下することを報告している。

このように少なくとも定性的には短波長域の感度低下が明らかになっているので、老人ホームや幼稚園などの照明設計を一つの感度曲線たとえば  $V(\lambda)$  などで統一的に扱うことにはそもそも矛盾がある。こうした矛盾を解決するためにも、今後可視域全体の感度について年齢変

化を定量的に検討することが重要である。

## 7. ま と め

以上述べたように、人間の比視感度は見る対象、環境、視作業などによってさまざまに変化する。現在標準化されている  $V(\lambda)$  や  $V'(\lambda)$  はその一部にすぎない。他のさまざまな視覚の特性を測光システムに反映するためには、比視感度を詳細に検討することが必要である。そのなかでもとくに、明るさ感覚や薄明視に対する比視感度とそれらに基づく測光システムの開発は当面の最も重要な課題といえよう。こうした問題を解決するためには、視覚や色覚のメカニズムに関する正しい知識が要求される。視覚研究と照明工学の密接な結びつきによって初めて、眞に視覚的に意味をもつ測光システムの開発が可能となるといえよう。

## 文 献

- 1) Commission Internationale de l'Eclairage: Light as a true visual quantity: Principles of measurement. *CIE Publication No. 41* (CIE, Paris, 1978).
- 2) M. Ikeda, H. Yaguchi and K. Sagawa: Brightness luminous-efficiency functions for  $2^\circ$  and  $10^\circ$  fields. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1660.
- 3) H. Yaguchi and M. Ikeda: Luminous efficiency functions by heterochromatic brightness matching for a wide range of retinal illuminance. *J. Light Vis. Environ.*, **4** (1980) 14.
- 4) K. Uchikawa and M. Ikeda: Temporal deterioration of wavelength discrimination with successive comparison method. *Vision Res.*, **21** (1981) 591.
- 5) 香取寛二、不破正宏: 交照測光法と異色直接比較法による  $2^\circ$  視野および  $10^\circ$  視野の比視感度関数。電子技術総合研究所彙報, **45** (1980) 139.
- 6) K. Sagawa: Minimum light intensity required for color rivalry. *Vision Res.*, **21** (1981) 1467.
- 7) 長谷川敬: 単色光の明るさマッチングにおける参照光の効果。第10回照明学会全国大会講演論文集 (1977) p. 52.
- 8) S. L. Guth and H. R. Lodge: Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity and a new color model. *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 450.
- 9) H. Yaguchi and M. Ikeda: Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching. *Vision Res.*, **23** (1983) 1711.
- 10) 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.
- 11) K. Sagawa and K. Takeichi: Spectral luminous efficiency functions for a ten-degree field in the mesopic range. *J. Light Vis. Environ.*, **7** (1983) 37.
- 12) K. Sagawa and K. Takeichi: Luminous efficiency functions for mesopic vision. *Light and Lighting '83 (Proceedings of CIE 20th session)*, D103 (CIE, Paris, 1983).
- 13) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science*, 2nd ed. (John Wiley and Sons, New York, 1982) p. 111.
- 14) M. Ikeda, H. Yaguchi, K. Yoshimatsu and M. Ohmi: Luminous-efficiency functions for point sources. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 68.
- 15) J. A. S. Kinney: Comparison of scotopic, mesopic, and photopic spectral sensitivity. *J. Opt. Soc. Am.*, **48** (1958) 185.
- 16) S. Kokoschka: Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung. *Die Farbe*, **21** (1972) 39.
- 17) M. Ikeda and H. Shimozono: Mesopic luminous-efficiency functions. *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 280.
- 18) M. Fuwa, K. Katori and N. Ooba: Spectral luminous efficacy functions for scotopic, mesopic, and photopic vision based on the new photometric unit. *Light and Lighting '83 (Proceedings of CIE 20th session)*, D104 (CIE, Paris, 1983).
- 19) D. A. Palmer: Standard observer for large-field photometry at any level. *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 1296.
- 20) S. Kokoschka and H. W. Bodmann: Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbewertung im gesamten Adaptationsbereich. *Proceedings of CIE 18th session* (CIE, Paris, 1975) p. 217.
- 21) 佐川 賢、武市啓司郎、荒居 廣: 薄明視の視感度 (IV). 第31回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1984) p. 80.
- 22) K. H. Ruddock: The effect of age upon color vision—II, Changes with age in light transmission of the ocular media. *Vision Res.*, **5** (1965) 47.
- 23) J. S. Werner: Development of scotopic sensitivity and the absorption spectrum of the human ocular media. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 247.
- 24) Y. Le Grand: Spectral luminosity. *Handbook of Sensory Physiology, VII/4, Visual Psychophysics*, ed. D. Jameson and L. M. Hurvich (Springer-Verlag, New York, 1972) p. 413.