

測光システム研究の現状

—国際照明委員会 (CIE) 補助測光システムの開発—

佐 川 賢

Present State of the Art of Photometry: Development of a CIE Supplementary System of Photometry

Ken SAGAWA

The standard photometric system developed by the CIE in 1924 has a difficulty in assessing lights in terms of apparent brightness, particularly for lights of highly saturated colors in photopic vision (chromatic contribution so called Helmholtz-Kohlrausch effect) as well as for colored lights such as red and blue seen at the mesopic range of intensity (rod contribution well known as Purkinje effect). Studies have been done in the CIE to investigate these problems in order to develop a system to supplement the current CIE photometric system with correct brightness evaluation. Chromatic and rod contributions to brightness were discussed as two major physiological effects to cause the brightness-luminance discrepancy. Possible ways of introducing these effects into current CIE photometric system and developing a supplementary system of photometry were described.

Key words: photometry, brightness, mesopic, Helmholtz-Kohlrausch effect, Purkinje effect

1. 国際照明委員会 (CIE) 測光システムの経緯と問題点

測光, 測色技術は人間の光環境を評価・設計するための基盤技術である。この技術によって外界の物理的エネルギーである光強度や分光組成の情報が, 人間の視覚にどのように取り入れられ, どのような効果を及ぼすかを知ることができる。国際照明委員会 (CIE) は 1924 年, 初めて人間の視覚系の標準的な分光視感効率関数 $V(\lambda)$ を国際的に定め, これを用いて輝度 L を, 次式に示すように分光放射エネルギー分布 $L_{e,\lambda}$ に $V(\lambda)$ の重みを付けて積分した量として定義した。

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

ここで, K_m は最大視感効果度とよばれる定数 (683 lm/watt) である。この計量化によって光源や物体を人間がみ

たときの明るさが客観的に評価できるようになり, 光, 照明など視環境の設計や評価に大きく貢献した。その後, CIE は 1951 年に暗所視における標準分光視感効率 $V'(\lambda)$ と暗所視輝度 L' を定めた。先の輝度 L が明所視 (数 cd/m^2 以上の明るいレベル) における網膜の錐体視細胞の視覚特性を反映しているのに対し, L' は非常に暗い暗所視 (およそ $0.001 \text{ cd}/\text{m}^2$ 以下) の桿体細胞の視覚特性を表す。

ところが, このように CIE が定義した明所視輝度 L が人間が物をみたときの明るさを正しく反映しているかが問題となった。例として, 色の鮮やかな光や物体をみたときの明るさは, 輝度から予想されるものよりもかなり明るいことが指摘された¹⁾。この現象はすでにヘルムホルツコールラウシュ効果として知られており, 1980 年ごろから CIE を中心に活発に研究が進められた^{2,3)}。それらの知見をもとに明るさのための測光システムを開発する動きが出てきた。

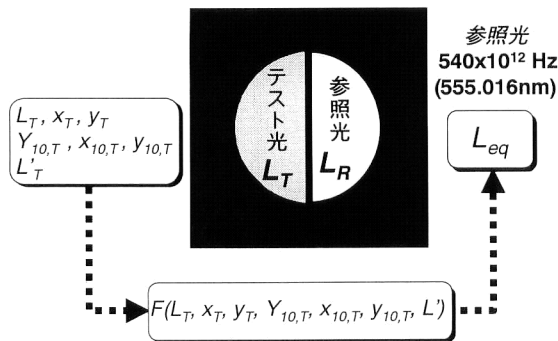


図1 明るさマッチングと等価輝度 L_{eq} の定義。B/L比は L_R/L_T で定義。等価輝度 L_{eq} は、参照光 540×10^{12} Hz の振動数 (標準空气中で波長 555.016 nm) の単色光でテスト光と同じ明るさとなる明所視輝度。

さらにもうひとつ、CIEの測光システムに大きな改良が必要であった。明所視輝度や暗所視輝度はすでに定義されたが、その中間の薄明視とよばれる薄明かりの環境の輝度は定義されていない。薄明視では桿体と錐体がともに働くため、いわゆるプルキンエ効果によって、赤色系はより暗く逆に青色系はより明るくみえる。 $V(\lambda)$ による明所視輝度は、もはや明るさを正しく評価できない。錐体と桿体が複雑に作用するので、分光視感効率も安定した関数として定義できない。もちろん薄明視輝度も定義されていない。研究は1960年ごろからすでに始まっていたが⁴⁾、本格的に研究が進んだのは最近である。現在では薄明視の視覚特性に関する知見も増え、具体的に測光システムを考える基盤ができてきた⁵⁾。同時に、照明工学の進歩とともに交通環境など夜間の作業や行動は着実に増え、薄明視環境の安全性評価のためにも、薄明視測光システムはぜひとも必要となった。

こうした2つの動きが1つになってより総合的な明るさの測光システムの検討へと進んだ。すなわちヘルムホルツコールラウシュ効果とプルキンエ効果の2つの特性を合わせた明るさ評価のための測光システムの開発である。CIEは1987年ベニス大会において、「補助測光システム」という技術委員会を設立し、明るさの測光システムを本格的に検討しはじめた。

ここではこうした経緯を踏まえ、明るさ測光システムの問題点と現状について述べる。

2. 明所視における明るさの測光システム

2.1 B/L比

CIEの明所視輝度 L (cd/m^2) を等しくした有彩色と無彩色の明るさを比較すると、有彩色の彩度が高ければ高いほど無彩色より明るくみえる。この現象は定量的にはB/L比

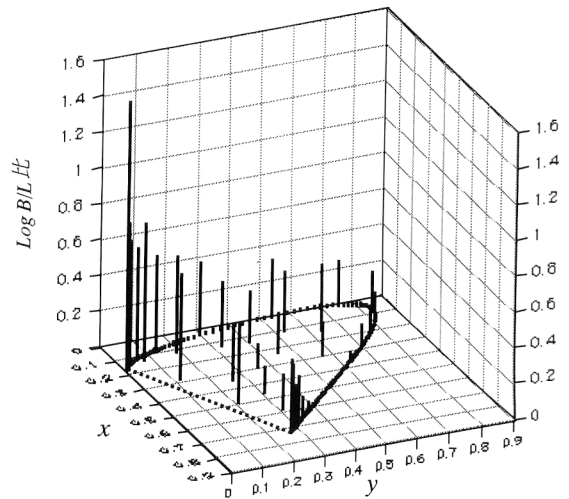


図2 10° 視野の明所視のB/L比のデータ⁶⁾。色度図上に3次元表示した、単色光31色、複合光20色のlog B/L比。

(brightness to luminance ratio) として表現される。図1に示すように、B/L比は等しい明るさにある参照光(通常白色)とテスト光の輝度比で表す。すなわち、

$$(B/L \text{ 比}) = (\text{テスト光と同じ明るさの参照光の輝度}) / (\text{テスト光の輝度}) \quad (2)$$

図1でいえば、 L_R/L_T であり、この比が1以上であれば、この色光は参照光よりも少ない光量で同じ明るさが得られることを示す。つまり明るさ効率はよいということになる。

B/L比データの一例として、 10° 視野で計測された単色光および複合光のデータを xy 色度図上に3次元で表現したものを図2に示す⁶⁾。彩度の高い青色系や赤色系の色光ほどB/L比は高く、一方、彩度の低い白色系や黄色系の色光のB/L比は低い。また、スペクトル光に近いほどB/L比は高い値を示す。B/L比のデータとその特徴は多くの研究によって確かめられ、それらの一部はCIEの技術委員会(TC1-21)でシステムの評価に用いられた⁷⁾。

2.2 等価輝度

B/L比はその定義からも容易に推測できるように、参照光の選択によってその値が異なる。SI単位系のひとつ、カンデラ (cd) の定義では、 540×10^{12} の振動数(標準空气中において波長 555.016 nm)をもつ単色光を参照光として用いている。このSI単位系と整合をとるためには、波長 555.016 nm の単色光を参照光として用いるのがよい。参照光が統一できれば、参照光の輝度値だけで光源や物体の明るさを表現できる。つまり図1に示すように、対象となる物体や光源と明るさマッチングを行い、「同じ明るさにみえる参照光(555.016 nm)の明所視輝度」で明るさが表現できる。これを等価輝度(equivalent luminance)とよぶ。

ただし、明るさを知るために常に参照光を用意して明る

表1 明所視2°視野の明るさの測光システム⁷⁾.

測光システム	特徴
ウェア・コーワン (1983)	色度座標 (x,y) の関数による B/L 比の実験式
グースら (1973, 1980)	無彩色成分と有彩色成分のベクトル結合による輝度
矢口・池田 (1980, 1984)	色応答の非線形性を考慮した非線形ベクトル輝度
中野 (1988, 1992)	錐体応答の対数線形結合

さマッチングすることは実用上ほとんど不可能である。ここで等価輝度をあらかじめ予測し計測できるシステムが必要となる。すなわち、図1に示すように、対象となる光源や物体の測光量・測色量、例えば x , y , L , L' 等から等価輝度 L_{eq} を得る計算法や計測法が必要となる。これが明るさの測光システムである。

2.3 明るさのモデル

B/L 比に関する検討の結果、彩度の高い色がより明るくみえる生理的原因は、視覚情報処理過程における色の出力が輝度の出力に足し合わされるためである、というように考えられるようになった。これに沿ったいくつかの明るさモデルが生まれた。Guth のベクトル輝度モデルはその代表的なものである⁸⁾。

表1はCIEの技術委員会TC1-21で検討された明るさを表す測光システムの主要なもので、明所視2°視野のものである⁷⁾。

これらのシステムは、実際に得られた明るさマッチングデータに基づいて、定量的な比較検討が行われた。その結果、どのシステムも現行のシステムより明るさの評価はすぐれていることが判明した。提案されたシステム間の差はわずかであるが、委員会では Nakano らのシステムが B/L 比を記述するのにすぐれているという結論に達した。ただし、実際に使うには複雑であるので、もう少し簡便なシステムに改訂することを条件とした。その結果、最終的に以下に示す式(3)が色の寄与を表す式として提案された⁹⁾。この式で B/L 比は $\log(L_{eq}/L)$ として表現されている。図3は Nakano らの B/L 比の式に従って等 B/L 比の等高線を色度図上に示したものである。等 B/L 曲線の楕円の方向など、実際に得られたデータをよく表現している。CIEではこの式を B/L 比の式として用いるよう検討を進めている。

$$\begin{aligned} \log(L_{eq}/L) = & (1/2)\log(-0.0054-0.21x \\ & +0.77y+1.44x^2-2.97xy \\ & +1.59y^2-2.11zy^2) - \log y \end{aligned} \quad (3)$$

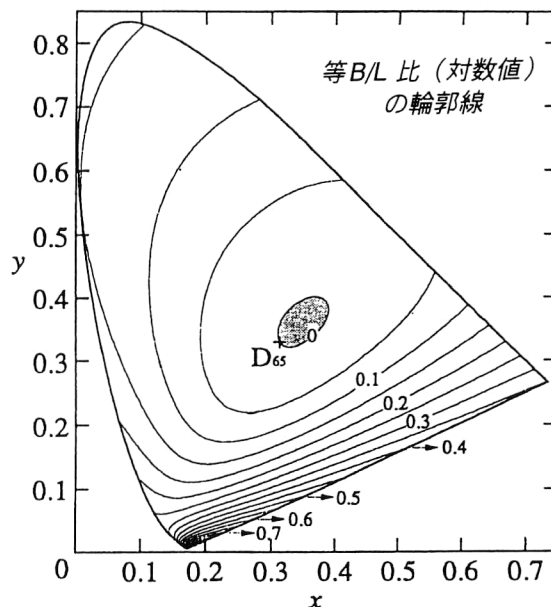


図3 Nakano ら⁹⁾の B/L 比の式に基づく等 B/L 曲線。D₆₅ は参照光。

3. 薄明視の測光システム

3.1 色の寄与

薄明視では輝度レベルの低下とともに桿体系が働き、色光の効率は明所視とは大きく異なる。一般的にはプルキンエ現象として知られているように、赤色系はより暗く青色系はより明るくみえる。明所視レベルでは、明るさは明所視輝度 L と前述した色応答の寄与 (B/L 比) で決まり、一方、非常に暗い暗所視レベルでは暗所視輝度 L' のみで決まる。この中間の薄明視では、明所視輝度、暗所視輝度、および色応答、の3つの量がそれぞれの寄与率で明るさを決定する。問題はこの結合がどのようなものであり、かつ、各成分がどのように重みをもつかである。

まず、色応答の寄与を考える。これまで提案された薄明視の測光システムのいくつかを分析してみると、色の寄与の仕方に2通りの考え方があることがわかる。1つは図4(a)に示すように、色応答(図では赤/緑、黄/青の色チャンネル)は、まず錐体輝度チャンネルと結びつき、その後、その合成されたものが桿体輝度と結びつく。この場合、色応答を含む錐体と桿体の結合の寄与率を表す重み係数、いわゆる順応係数を a (錐体の寄与率を表し、 $0 \leq a \leq 1$) とすれば、この寄与率 a は自動的に色応答にもかかる¹⁰⁾。もちろん桿体の寄与率は $1-a$ となる。

一方、色の寄与を桿体錐体の結合とは独立に考える方法もある。図4(b)に示すようにプルキンエ現象を引き起こす桿体系と錐体系の結合は輝度チャンネルどうし、すなわち L と L' が結合され、その結合した輝度チャンネル信号に最

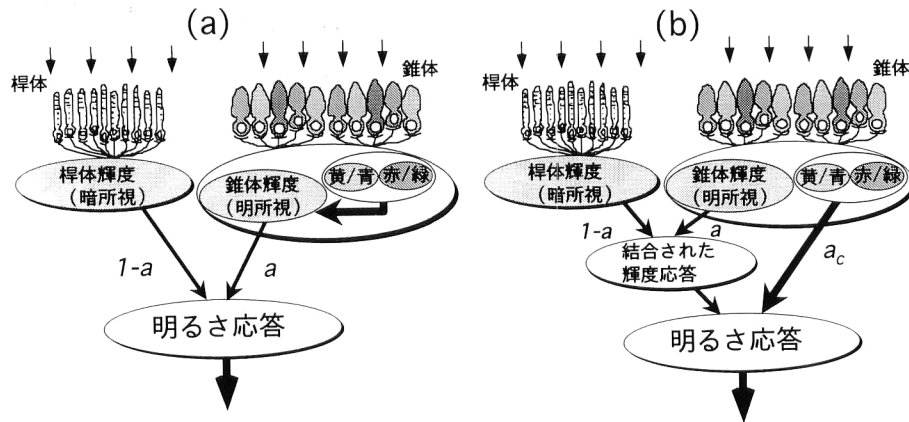


図4 薄明視における色の寄与に関する2つの理論的経路。(a) 錐体内で結合された輝度と色が桿体輝度と結合。(b) 錐体と桿体の輝度どうしが結合し、それに色の寄与が追加。

表2 薄明視10°視野の明るさの測光システム⁷⁾。

測光システム	特徴
パーマー第1システム (1968)	Y_{10} (10°視野明所視輝度に対応)と暗所視輝度 L' の線形結合
パーマー第2システム (1981)	Y_{10} (10°視野明所視輝度に対応)と暗所視輝度 L' の非線形結合
佐川・武市 (1986, 1992)	「明所視輝度 L +色応答」と暗所視輝度 L' の幾何平均、繰り返し計算要
中野・池田 (1986, 1992)	「明所視輝度 L と暗所視輝度 L' の幾何平均」+色応答
ココーシュカ・ボードマン (1975, 1980)	10°視野3刺激値 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} ,と暗所視輝度 L' の線形結合
トレゾナ (1989)	双曲線関数による明所視から暗所視への移行。 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} ,と V' の多項式によるパラメーター設定
芦澤ら (1985, 1991)	双曲線関数による明所視から暗所視の物体色明度の記述

最終的に色の寄与が加わる。この場合、色の寄与率については独自の順応係数 a_c が必要とされるので、桿体錐体の順応係数 a と合わせて2つの順応係数が必要となる¹¹⁾。

表2は、これまで提案された薄明視を含むすべてのレベルの明るさ評価のための測光システムである。このうち、佐川・武市¹⁰⁾、トレゾナ¹²⁾のシステムは前者、すなわち色の寄与を含めた錐体系が桿体系と結びつく方式である。一方、中野・池田¹³⁾、芦澤ら¹⁴⁾は色の寄与を独立に考える方式である。ココーシュカ・ボードマン¹⁵⁾もこの考えを採用している。

定量的にどちらが有効かを決定することは難しいが、図

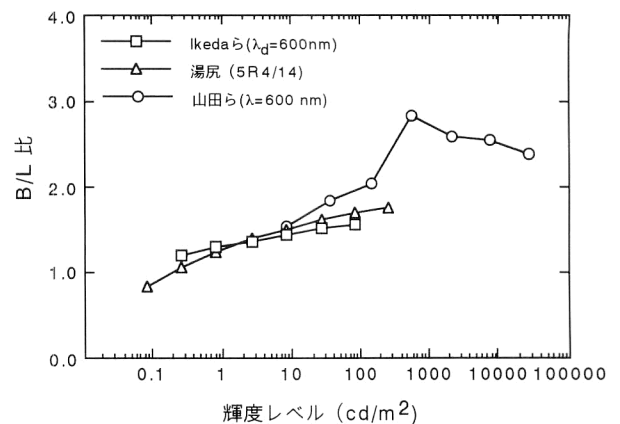


図5 高輝度レベルにおけるB/L比の実験データ。いずれのデータも高輝度レベルでB/L比が上昇。

5に示すIkedaら¹¹⁾、湯尻¹⁶⁾、山田ら¹⁷⁾の高輝度レベルのB/L比のデータを見ると、暗所視の寄与のなくなった高い輝度レベルでもB/L比が依然上昇していくことを考えると、色の寄与を独立に考えるほうが有力である。すなわち、100 cd/m²以上でもB/L比が依然上昇していることは、色の寄与を桿体錐体の結合とは独立に考え、十分高い輝度レベルでもB/L比が上昇するような係数の設定が必要であることを示している。CIEの技術委員会TC1-37では色の寄与を独立とする測光システムの考えを進めている。

3.2 順応係数の決め方

次に考えるべき重要な点は順応係数の決定である。順応係数は桿体錐体の結合の重みを決める重要な係数であり、明所視の寄与を a 、暗所視の寄与を $(1-a)$ と拮抗するメカニズムを考えれば、明所視で1.0、暗所視で0となる。この係数の決め方について、ここでも2つの考え方がある。図6の中の右側の点線で示すように、1つは明所視輝度 L の関数として表す方法で、たとえば生理学で用いられるシグマ関数等を用いて桿体錐体の寄与率 a を $a=L^n/(L^n+$

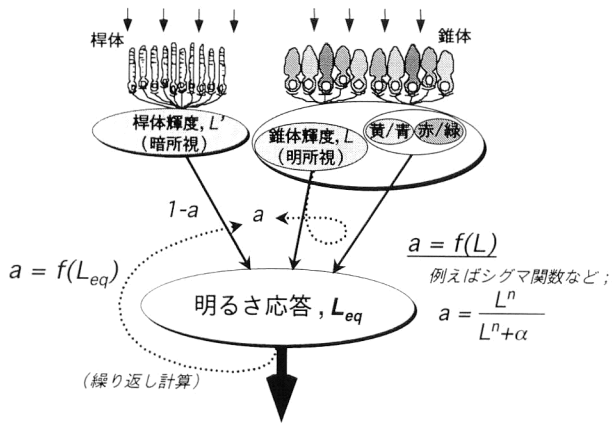


図6 桿体錐体結合の順応係数の決定方法。明所視輝度 L の関数で決定する方法(右側点線の経路)と等価輝度 L_{eq} の関数で決定する方法(左側点線の経路)で、表す2通りの考え。

a^n) のように表す。 L が大きければ1, 小さければ0 となる。ここで例えば n を1にとると, a は下記のように表される。

$$a = L / (L + \alpha) \quad (4)$$

α はパラメーターで, データを記述できる最適なものを選ぶ。

もう1つの考え方は, 図6における左側の点線の経路で示されるように, a は最終的に得られる明るさの量, すなわち等価輝度 L_{eq} の関数で決められるというものである。すなわち, みかけの明るさによって桿体錐体の寄与率が決まるというものである。この場合はあらかじめ a と L_{eq} の関係を実験値等で数量化しておき, そのルックアップテーブルを参照しながら繰り返し計算をして, a と L_{eq} の最適解を見いだす。繰り返し計算がある分だけやや複雑なシステムとなるが, これも有力なひとつの考え方である。パーマー第1システム⁴⁾, 中野・池田¹³⁾ は前者の考え方, 佐川・武市¹⁰⁾, コーシュカ・ボードマン¹⁵⁾ は後者の考えに基づく。この問題も, 定量的には微細な問題なので, データからどちらが正しいかを結論づけるのは難しい。システム構築の簡便さ等, 他の要素を考慮して決めるべきといえよう。

4. 補助測光システム

前項で検討した明所視における色の寄与を表す測光システム, および薄明視における桿体の寄与を表す測光システム, の2つを組み合わせると新しい1つの測光システムが構築される。すべてのレベルの明るさの評価に適用できる測光システムである。前述したように, 現在の $V(\lambda)$ に基づく測光システムは明るさの評価に関しては不備があるので, これを補う意味で補助測光システム(supplementary system of photometry) とよばれる。こうよぶ背景には,

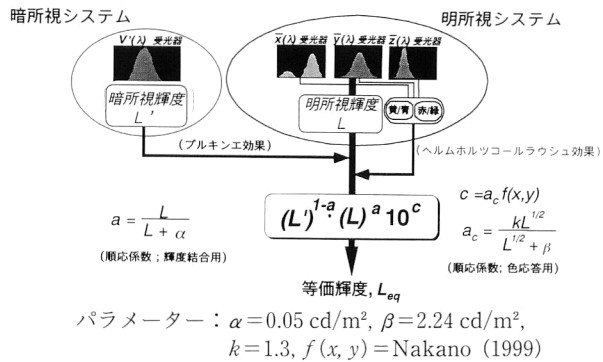


図7 すべてのレベルの明るさ評価に用いる補助測光システムの例。明所視システムと暗所視システムから, 明所視輝度 L , 暗所視輝度 L' の重み付き幾何平均に, 色の寄与 10^c が加わる。パラメーターは暫定的な値。

現行の $V(\lambda)$ に基づく測光システムを維持したまま新しいシステムを追加として導入し, 決して従来のシステムを置き換えるものではない, という意味が込められている。CIEの技術委員会 TC1-37では, これまでの種々の検討に基づき, 委員会として1つの補助測光システムを提案しようとしている¹⁸⁾。

図7は提案しようとするシステムの例である。桿体と3種の錐体に対応する4つの入力から, 錐体系として明所視輝度 L , および色応答赤/緑, 黄/青(2種の反対色応答に対応)を取る。一方, 桿体系からは暗所視輝度 L' を取る。これらの3種の出力を次式に示すように,

$$L_{eq} = (L')^{1-a} \cdot (L)^a \cdot 10^c \quad (5)$$

という重み付け幾何平均で表す。これが明るさに対応する等価輝度 L_{eq} となる。 L' で表される項はプルキンエ効果を表し, 10^c で表される項は色の寄与, すなわちヘルムホルツコールラウシュ効果を表す。

順応係数 a は明所視輝度 L の関数として表すが, パラメーター α はこれまでのデータを参考にして最適な値に設定する。一方, 色の寄与については, まず明所視レベルの寄与を色度 (x, y) の関数として決める。この関数として以前は Ware-Cowan の式が用いられていたが¹⁹⁾, 前述したように TC1-37では Nakano らの式を有力とみて, これを採用しようとしている⁹⁾。この色の効果は輝度レベルとともに変化するので, a_c という色に関する独立した順応係数を桿体錐体の順応係数とは別に導入する。 a_c も明所視輝度 L の関数としてパラメーター β を用いて図に示されるような式で表す。色の寄与は明所視の高いレベルまで持続して増加するので, その効果を記述するため, シグマ関数の指数 n と係数 k を適切に決める。ここでは指数 n は0.5, 係数 k は1.3を暫定的に使用している。これらの係数をもとに, 図7に示されたシステムによって等価輝度 L_{eq}

が算出される。図に表されているいくつかのパラメータは現在のところ最適と考えられるが、もちろん今後変わり得る。CIE TC1-37ではこのモデルを補助測光システムとして提案する予定で、データとの照合や必要に応じてパラメータの最適化などを進めている。

CIE 測光システムの長い歴史からみると、現在は大きな変化の時期にきている。1951年の暗所視輝度の定義を除けば、現在は1924年以来の大きな変革である。薄明視を含むすべてのレベルの明るさに適用できる補助測光システムを確立することで、1960年代以来問題にされていた薄明視を含む色光の明るさの問題がひとまずひとつの解決を得る。ただし、測光システムの検討はこれが終わりではない。視覚系は観察条件や視作業で働きを変えるので、理想的にはその作業に応じた測光システムが要求される。明るさの測光システムはそのスタートである。今後、視覚系の特性に応じた適切な測光システムの検討が系統的に展開されると思われる²⁰⁾。

文 献

- 1) CIE TC 1.4: *Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*, CIE Pub. No. 41 (CIE Central Bureau, Paris, 1978).
- 2) CIE TC1-02: *Spectral Luminous Efficiency Functions Based upon Heterochromatic Brightness Matching for Monochromatic Point Sources, 2° and 10° Fields*, CIE Pub. No. 75 (CIE Central Bureau, Vienna, 1988).
- 3) CIE TC1-03: "Models of heterochromatic brightness matching," CIE J., **5-2** (1986) 57-59.
- 4) D. A. Palmer: "Standard observer for large-field photometry at any level," J. Opt. Soc. Am., **58** (1968) 1296-1299.
- 5) CIE TC1-01: *Mesopic Photometry: History, Special Problems, and Practical Solutions*, CIE Pub. No. 81 (CIE Central Bureau, Vienna, 1989).
- 6) 佐川 賢, 武市啓司郎: "10° 視野の直接比較法による明所視, 薄明視, 暗所視の視感効率データ", 製品科学研究所報告, **122** (1992) 1-39.
- 7) CIE TC1-21: *Testing of Supplementary System of Photometry*, CIE Pub. No. 141 (CIE Central Bureau, Vienna, 2001).
- 8) S. L. Guth and H. R. Lodge: "Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model," J. Opt. Soc. Am., **63** (1973) 450-462.
- 9) Y. Nakano, K. Yamada, K. Suehara and T. Yano: "A simple formula to calculate brightness equivalent luminance," *Proceedings of the CIE 24th Session*, Vol. 1 (CIE Central Bureau, Vienna, 1999) pp. 33-37.
- 10) K. Sagawa and K. Takeichi: "System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships," J. Opt. Soc. Am. A, **9** (1992) 1240-1246.
- 11) M. Ikeda, C. C. Huang and S. Ashizawa: "Equivalent lightness of colored objects at illuminances from the scotopic to the photopic level," Color Res. Appl., **14** (1989) 198-206.
- 12) P. W. Trezona: "A system of mesopic photometry," Color Res. Appl., **16** (1991) 202-216.
- 13) 中野靖久: "明るさ知覚モデルとその個人データへの適用", 光学, **21** (1992) 705-716.
- 14) 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の実験と解析", 照明学会誌, **69** (1985) 274-280.
- 15) S. Kokoschka and H. W. Bodmann: "Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbewertung im gesamten Adaptationsbereich," *Proceedings of the CIE 18th Session* (CIE Central Bureau, Paris, 1975) pp. 217-225.
- 16) 湯尻 照: "照度レベルによる表面色の明るさ知覚", 照明学会誌, **73** (1989) 295-302.
- 17) 山田 誠, 佐川 賢, 矢口博久, 三宅洋一: "高輝度レベルの分光視感効率", 光学, **20** (1991) 514-520.
- 18) K. Sagawa: "Supplementary system of photometry—Photometric system for brightness at any level—," *Proceedings of Colour and Visual Scales 2000* (National Physical Laboratory, London, 2000).
- 19) K. Sagawa: "Luminous efficiency for brightness in the mesopic range and its theoretical implication," *Proceedings of Vision at Low Light Levels* (Electric Power Research Institute, California, 1998) pp. 41-50.
- 20) K. Sagawa: "The future of CIE photometry—Towards a system more visually meaningful," *Proceedings of CIE Symposium '99—75 Years of CIE Photometry—* (CIE Central Bureau, Vienna, 1999) pp. 30-1-30-5.

(2001年8月8日受理)