明るさの評価と測光システム[†]

専門会員 佐 川 賢*

輝度は光源や物体の明るさを表す測光量と考えられている。しかし、鮮やかな色がついた物体を見る時や薄暗い環境で物を見る時などは輝度は必ずしも私達の明るさ感覚と対応しない。

ここでは、輝度と明るさの違い、その視覚的な原因、さらに明るさに基づく新しい測光システムとは何かについて考える。

1. 見えの明るさと輝度

人間が光源や物体を見たとき感ずる明るさを正しく計測したり、予測したりすることは照明の最も基本的かつ重要な技術である。国際照明委員会、CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) が1924年に定義した輝度はこの目的のために国際的に勧告されたもので、以来およそ70余年にわたって世界各国で広く用いられてきたものである。図1は輝度の定義の概念を示したものである。輝度 L は、光源や物体から発する分光放射輝度分布 $L_{e,\lambda}$ に、標準的な人間の目の効率、すなわちCIE標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ の重みをつけて足し合わせた量として定義される。すなわち、

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

となる。ここで K_m は最大視感効率と呼ばれる定数で、683

$$\text{輝度 } L : L = K_m \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

図1 輝度の定義

lm/watt の値をとる。

この式の意味は、外界から眼に入る光に眼と同じ特性を有する $V(\lambda)$ というフィルターをかけて光を計測することを意味する。従って、標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ は輝度の定義において最も重要なもので、これが正しく決められないと輝度が視覚系の明るさと対応しなくなることは言うまでもない。 $V(\lambda)$ 関数は、CIEが明所視と呼ばれる比較的明るいレベルにおいて、主に交照法と呼ばれる感度計測手法を用いて決められたもので、100人ほどの観測者のデータをもとに決定している。

さて、このCIE輝度が10数年前から盛んに見直されるようになった。見直しとはもちろん、輝度が人間の明るさ感覚に対応しているかどうかを再検討することである。この問題を引き起こす主たる要因は次の2つにあった。一つは視環境が以前にくらべ非常にカラフルになったこと、もう一つは、生活の時間帯が夜間に入り込み人工照明下など、今までよりも比較的低照度レベルの視感境が増えたことである。こうした環境でも、CIEの輝度は光源や物体の明るさを評価する上で有効であるかが問題の焦点となった。

例えば、色のついた物体や光源の明るさは同じ輝度値であっても、より鮮やかな色のほうがより明るく見える。また、照度が下がるにつれて青色系はより明るく、逆に赤色系は暗くかすんで見えるという視覚的現象もある。これらの現象は以前から指摘はされていたが、前述した視環境の変化でより誇張されてきたわけである。つまり、輝度は光源や物体の明るさを常に正しく表現しているわけではないことが盛んに指摘された。

原因はもちろん、人間の視覚系の感度変化にある。すなわち、(1)式の $V(\lambda)$ は決して汎用ではない。人間の視覚は環境や見るものに依じて感度特性を変えていく。こうした感度変化の生理的機構をどのように理解し、測光システ

[†] Assessment of lights in terms of brightness and a photometric system

* 製品科学研究所

Ken Sagawa

ムに取り入れていくかが、現在の明るさに基づく測光システムの課題である。以下、明るさの知覚に関係する2つの視覚特性を紹介して、測光技術への応用を考えてみる。

2. ヘルムホルツ・コールラウシュ効果

カラーディスプレイなどで赤や青などの鮮やかな色の明るさを輝度計で計測してみると意外に低い輝度でも明るく見えることに気がつく。実際、等しい輝度の赤色と白色を並べて見比べてみると、赤色のほうがはるかに明るい。このように同じ輝度でも鮮やかな色がより明るく見える現象をヘルムホルツ・コールラウシュ効果、と呼び、明るさ知覚における色の寄与と考えられている。一例として、図2に2つの異なる方法で測定された視覚系の分光視感効率曲線を示す。一つは前述したCIEの標準分光視感効率 $V(\lambda)$ であり、もう一つはCIEが最近確立した明るさ知覚に対する分光視感効率 $V_b(\lambda)$ である¹⁾。 $V(\lambda)$ は交照法という時間的に早いちらつきを用いるため、この測定法では視覚系の色応答がもはや寄与しない。一方 $V_b(\lambda)$ は直接比較法という定常的に出された光を見て明るさを判定するのでここでは色の応答が十分寄与する。そのため図2に示すように、この2つの方法で得られた分光効率曲線に差が現われ、特に彩度の高い短波長領域(青)や長波長領域(赤)の色光で効率が上昇する。これがヘルムホルツ・コールラウシュ効果である。

色のついた光源や物体が無彩色に比べてどのくらい明るく見えるかという定量的な表現については、以下に示す B/L 比(Brightness to Luminance Ratio)という量で表すのが一般的である。これは無彩色の参照光と有彩色の色光の明るさを合わせたときのそれぞれの輝度値を用いて以

下のように定義する。
$$B/L \text{ 比} = \frac{(\text{参照光の輝度})}{(\text{参照光と同じ明るさに見える色光の輝度})}$$

通常この比は1であるが、彩度の高い色光は明るく見えるので低い輝度でマッチングし、その結果 B/L 比は1以上になる。すなわち B/L 比は高ければ高いほど明るさの効率が良いことを示す。

ヘルムホルツ・コールラウシュ効果の視覚的な原因は、視覚系の色チャンネルが輝度チャンネルに寄与するためと考えられている。図3はその概念を示す。視覚系の中には、長、中、短波長にそれぞれ感度の良い3種の錐体細胞が存在し、それらの出力から1つの輝度信号と、2つの色信号が取り出される。明るさはこの輝度信号に色信号が足し合わせられたものと考えられるが、従来の測光システムでは明るさは輝度チャンネルのみで決定され、 $V(\lambda)$ 関数は輝度チャンネルの分光特性と考えられていた。つまり、色の寄与が考慮されていなかった。そこで、色チャンネルの情報を輝度情報に加えて正確に明るさを表すための工夫がなされた。

例えば、輝度チャンネルと色チャンネルの情報のベクト的に足し合わせる方法などがあり(Guth ら, Yaguchi-Ikeda), これでかなり色の寄与が記述でき、測光システムも比較的理解しやすい。また、生理的機構に基盤を置いたものとして、3種の錐体細胞の対数線形加算で明るさを表すもの(Nakano ら)もある。一方、実用的な簡便さを重視して、色度 x, y の多項式で B/L 比の実験式を導くもの(Ware-Cowan), などがあり、現在では主なもので4つのシステムが提案されている²⁾。

こうした測光システムは次に示すプルキンエ効果を示す測光システムとともに現在CIEの技術委員会で評価され、近い将来国際的に用いられるシステムが確立されることになる。

図2 標準分光視感効率 $V(\lambda)$ と明るさの分光視感効率 $V_b(\lambda)$

図3 明るさ知覚における色の寄与を示す視覚モデル

3. プルキンエ効果

暗くなると青の色光がより明るく見え逆に赤の色光がより暗くかすんで見える現象をプルキンエ現象と呼ぶ。網膜にある受光器には錐体細胞と桿体細胞の2種類があることは良く知られている。錐体細胞は明るいレベルで働き、色も形も良く見ることができる。およそ数ルクス以上のレベルであり、これを明所視と呼ぶ。一方、桿体細胞は夜間の暗いレベルで働き、絶対的な感度は優れているものの明暗のみで分解能も悪く、色も見えない。照度約0.01ルクス以下でこのレベルとなり、暗所視と呼ばれる。分光感度も錐体と桿体では異なり、桿体は錐体に比べて短波長、すなわち青の色光に対して感度が良い。従って昼間の明るいレベルから夜の暗いレベルに移行するにつれて視覚系全体の感度も徐々に短波長領域の感度が上昇し、相対的に長波長領域の赤の感度が低下する。この移行する領域を薄明視と呼ぶ。

図4は具体的に薄明視の分光視感効率の変化を示したものである³⁾。明所視(○)から暗所視(●)までの9レベルについてそれぞれ視感効率を求めたもので、曲線の形の変化を見やすくするためにほぼ中間の570nmで規格化してある。これをみると測定レベルが下がるにつれて短波長領域の効率が相対的に上昇し、一方長波長領域では低下する様子が良く表されている。両者の相対的な変化は最大で2対数単位すなわち100倍あるいは100分の1にも及ぶ。

薄明視領域ではこうした感度変化が存在するためにはや $V(\lambda)$ を用いた(1)式の輝度が明るさを正しく表さないのは明らかであり、ここでもし正確に明るさを表すためには、視覚系と同様にレベルと共に自動的に感度変化する機能を測光器に持たせなければならない。方法はすでにいくつか提案されている。

図4 薄明視の分光視感効率
○: 100 Td レベル (明所視)
●: 0.01 Td レベル (暗所視)

基本的な考え方は、図5に示すように桿体の出力と錐体の出力をレベルとともに重みを付けて結合する、という方法である。錐体系の出力は前述したように輝度チャンネルと色チャンネルに分かれるので、ヘルムホルツ・コールラウシュ効果を引き起こす色チャンネルの出力が桿体出力との結合の前で寄与するか、後で寄与するか(図5の点線の経路)が一つの問題となる。桿体系の出力は桿体の分光視感効率を基にした暗所視輝度のみであるのでこれを錐体の輝度チャンネルや色チャンネルと結び付ければ良い。

もう一つの問題は順応係数と呼ばれる桿体系錐体系の重み係数をどのように決定するかである。図5の順応係数 a は桿体の寄与を表し、この値は暗所視レベルではもちろん1.0であり、レベルが上がるにつれて単調に減少し、やがて明所視になると0となる。すなわち明るくなるにつれて桿体の寄与が徐々に少なくなることを意味する。錐体の寄与は逆に $(1-a)$ で表される。もし色の寄与を桿体錐体結合の後に考える場合は、また特別な係数 a' が必要となるわけである。実際にはどのようにこの順応係数を決定するかが重要な問題となり、ここで各提案されたシステムでそれぞれの方式が異なる。詳細はここでは割愛するが、すでにCIEを中心にして英国のPalmerやTrezona、ドイツのKokoschka-Bodmann、日本からNakano-Ikeda、Sagawa-Takeichiさらに芦澤らなど、いくつかのシステムが提案されている⁴⁾。それらの評価が現在CIEを中心に進められており、照明学会でも研究調査委員会で検討されている²⁾。

4. すべてのレベルに適用できる明るさの測光システム

明るさ知覚の主たる特性であるヘルムホルツ・コールラウシュ効果とプルキンエ効果を組み合わせると、明るさに

図5 薄明視を含む明るさ知覚のモデル

基づく測光システムのほぼ概要ができあがる。すでに図5に示されたモデルはこれらの効果を含んだものである。基本的な設計はできあがっており、こうしたシステム一つで暗所視から明所視までの幅広いレベルを受け持つことができる。

すべてのレベルに適用できる明るさの測光システムを考える時にもう一つ考えなければいけない重要な点は、明所視のかなり高い輝度レベルになると色の寄与が増加することである。最近になって、照度が上がると色の見え、特に物体の色の見えが鮮やかになり、明るさも増すことが報告され⁵⁾、これまで明所視ではもはや変化無しと考えていた従来の測光システムもこの点を考慮する必要が出てきた。幸い、データも徐々に整い、色の寄与が明所視でも照度や輝度レベルの増加とともに増えていくことが明らかとなった。こうした点を測光システムにとり入れることができれば、視覚系の働く全域、つまり星明かりから太陽の下までをカバーする測光システムが完成し、明るさの評価が正し

く行なわれることになるであろう。

参 考 文 献

- (1) CIE TCI-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)
- (2) 照明学会: 明るさの計量化研究調査委員会報告書, 照明学会 (平2)
- (3) Sagawa, K. and Takeichi, K.: Mesoic spectral luminous efficiency functions: Final experimental report. *J. Light Vis. Env.* **11** (1987) 22-29.
- (4) CIE TCI-01: Mesopic photometry: History, special problems, and practical solutions, CIE Pub. No. 81, CIE Central Bureau, Vienna (1989)
- (5) Ikeda, M., Huang, C. C., and Ashizawa, S.: Equivalent lightness of colored objects at illuminances from scotopic to photopic level. *Col. Res. Appl.* **14** (1989) 198-206.

(受付 1991 年 4 月 30 日)

照明ニュース

—東京支部—

第2回 池田賞は正会員湯川龍二氏に

電気設備に関する学術及び技術の向上に顕著な功績をあげられた方に贈られる池田賞の第2回受賞者は、湯川龍二氏に決定した。

池田賞は、わが国の電気設備の学術及び技術の発展に全生涯を捧げられた故池田栄一氏の御功績を永く記念するために、池田家からの寄贈により、社団法人電気設備学会が設立したものである。

このたび、受賞された湯川龍二氏は、昭和55年(社)日本電設工業協会副会長に就任し、技術委員長、運営委員長、積算体系見直特別委員長及びBELCA(建築・設備維持保全推進協会)テクスフェア出展実行委員長などを担当、また(社)日本計装工業会副会長、(社)建築設備技術者協会副会長として、現在もその役職にあり、電気設備技術の向上及び電気設備業界の発展、並びに建築設備士の地位確立及び建築設備技術の向上に貢献されている。また、氏は昭和57年から平成2年まで建設省中央建設審議会委員、昭和62年から電気工事施工管理技術検定委員として建設行政に関与され、電気設備業界及び建設業界において

指導的役割を果たされている。

贈呈式は6月13日(木)竹橋会館(東京都千代田区大手町)にて、(社)電気設備学会の総会終了後、表彰式において賞状並びに副賞として金百万円が贈呈され、引き続き受賞記念講演会が行われた。

「湯川龍二氏略歴」

大正5年7月14日北海道に生まる。昭和14年3月北海道帝国大学電気工学科卒業。昭和14年4月鉄道省電気局に奉職。昭和21年以降経済安定本部、総理府、人事院を経て、昭和27年5月日本国有鉄道に勤務。昭和41年6月常務理事。昭和44年7月帝都高速度交通営団理事に就任した。昭和53年12月日本電設工業株式会社社長に就任し、現在に至っている。

その間、電気設備関係において、上記の団体役員のほか(社)電気学会電気規格調査会副会長、(社)照明学会正会員、IEC・TC9(輸送用電気設備)国内委員会委員、日本工業標準調査会委員など、現在もその役職にあり、貢献されている。

(正会員・館山昭一郎)