3. 光源をはかる

3.2 光源の光学特性

神野 雅文, 本村 英樹
(愛媛大学工学部電気電子工学科)

Light Source Measurement Luminous Characteristics of Light Sources

JINNO Masafumi and MOTOMURA Hideki

Department of Electrical and Electronic Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

(Received 8 October 2005)

The sensitivity of human eye is not flat against wavelength of light. In the field of light sources, this forces us to calibrate physical indexes by human eye sensitivity. For example, light power is expressed in a physical unit of Watt [W], however, in the field of lighting it is converted to "luminous flux" with unit of lumen [lm]. Since these indexes have no physical quantities any longer, it is difficult for the researchers not related to lighting to guess their meanings instinctively. Therefore the luminous characteristics are explained in this section.

Keywords:

light source, energy efficient, discharge light source, mercury-free, molecular discharge

3.2.1 はじめに

放電光源のプラズマとしての各種特性の計測法とその実例については前節で紹介しました。プラズマ計測そのものについては本誌の読者の皆さんには釈迦に説法でしょう。他方、放電光源の研究ではプラズマそのものに加え、プラズマからの光を「光源の観点」から評価する必要があります。ほとんどの大学の講義から「照明工学」が消えてしまった現在、プラズマの光源としての特性については、若手の研究者を中心にあまり馴染みのない方が増えているのではないかと思います。そこで本節では光源を評価する時に使用される各種のパラメータとその測定法を紹介します。

3.2.2 比視感度

光源には様々な用途がありますが、照明用の光源については最終的には人間の目にどのように映るかで評価されます。そのため、プラズマ工学や分光光学の分野では光の強度はエネルギーで、光の色は波長で、光の質は分光分布で、と物理量で評価されるのに対して、同じ可視光を扱っていても、人間の目の感度が波長に対して一定ではないために、照明光源の分野では純粋な物理量だけではなく、これらの物理量を人間の目の波長感度で補正した量が用いられます。この補正に用いる感度曲線は比視感度と呼ばれ、国際照明委員会(CIE)により標準比視感度が定められています。

3.2.3 光束

光は電磁波であり、電磁波はエネルギーを持っています。単位時間にある面を通過する流れを束(フラックス)と言いますが、光にもフラックスは存在しそれを放射束と言います。この放射束に比視感度をかけて人間の感じる光の量に換算したものが光束と呼ばれる量です。光速は通常 ϕ で表され、その単位は lm (ルーメン) です。なお、ルーメンの l は筆記体で表するのが慣例となっています。

光源の発する光束は光束積分球(単に積分球とも言う)と呼ばれる球体と照度計を使って測定することができます。照度球の中心に光源を置いて、球の内壁で光を多重反射させて等方な光に拡散・変換します。そして、球殻の一部に開けた小窓における照度を照度計で測定して光源の発する全光束を求めることができます。

3.2.4 照度

照度は単位面積あたりに受ける光の量をあらわし、測定場所の明るさを意味します。通常 E で表されます。照度は光束を光束を受けている面積で割ることで算出できます。単位は lx (ルクス) で、 lm/m^2 と同じ次元を持ちます。光を受ける面積を S とすると、 $E = \phi/S$ の関係があります。照度は照明環境の明るさを評価するときの基準となる数値で、Table 1 のように、日本では JIS 規格によって場所と作業の内容に応じた適切な照度が定められています。照度は照度計という計測器で測定することができます。

Table 1 労働安全衛生法に定められた照度の基準最低値

作業の区分	基準照度
粗な作業	70 lx 以上
普通の作業	150 lx 以上
精密な作業	300 lx 以上

3.2.5 光度

光源は光を発しますが通常その光は等方的には発せられません。光源が発する光の強度の方向分布を配光特性もしくは単に配光といいます。光源がある方向に発する「光の強さ」を光度と呼び、その方向の単位立体角あたりの光束で表されます。一般に光度は I であらわされ、 ω の立体角に見込まれる光束が ϕ のとき、 $I = \phi/\omega$ の関係があります。光度の単位は cd (カンデラ) です。

3.2.6 輝度

照度は面に届く光の明るさの単位ですが、ある面がある方向から見てどのくらい明るく光を発しているかを示す尺度が「輝度」です。輝度は L で表され、ある方向への光度をその方向への見かけ上の面積で割った値で与えられ、 $L = I/S$ の関係があります。輝度の単位は cd/m^2 (カンデラ/平方メートル) となります。輝度は輝度計によって計測することができます。輝度計を使用するときには、光源の大きさと明るさによって光源からの距離と視野角を適切に選択する必要があります。一般照明用の水銀蛍光ランプの輝度は $10,000 \text{ cd}/\text{m}^2$ 程度です。次に説明する効率と並んで、輝度は照明用の光源の重要な性能評価指数です。

3.2.7 効率

通常の物理的意味で効率といえば、「入力（電力）1 W あたり何 W の出力を得られるか」を意味しますが、照明工学の分野においては人間の見え方での光の明るさを指標とするために、発光効率は物理で言う入力エネルギーと出力エネルギーの比ではなく「入力電力 1 W あたりの光束」で表現されます。この発光効率はランプ効率と言われることもあります。発光効率の単位は lm/W (ルーメン/ワット) で、現在使用されている一般照明用の水銀-アルゴン蛍光ランプでは大体 $100 \text{ lm}/\text{W}$ 程度の発光効率となっています。発光効率は光源の重要な性能のうちのひとつです。特に、最近省エネルギーが重要視されていることから、発光効率は最も重視される特性であると言えるでしょう。水銀蛍光ランプに代わる新しい光源の開発が進められていますが、どのようなモノになるにせよ、発光効率が $100 \text{ lm}/\text{W}$ を超えることが次世代一般照明光源の必須の条件となるでしょう。

3.2.8 色度

色には物体色（光が物体で反射したときの色）と光源色（物体が自ら光を発するときの色）があります。したがって、プラズマや放電光源の発光色を評価するときには光源色の表現方法を使用します。人間の目には赤、緑、青の光

にそれぞれ反応する 3 種類の視細胞がありそれぞれ光の波長に対する感度特性が異なっています。3.2.2 節で紹介した比視感度はこの 3 つの視細胞の感度曲線の合成曲線になっています。したがって、3 種の視細胞のそれぞれがどの程度刺激を受けているかを評価すれば、光の色を表現できることになります。これが、ディスプレイで R, G, B の光の三原色が使用される理由です。

光源色を表現するのによく使われるのは、CIE1931 色度図、CIE1964 色度図、そして、CIE1976 UCS 色度図です。これらは変換法が異なりますが、3 刺激値に対応して、X, Y, Z の三次元で表される色の情報を二次元平面で色度として表現するようにしたものです。以下、CIE1931 について説明します。3 刺激値は次に示すように、光源の放射強度の相対分光分布に等色関数をかけて規格化することで算出されます。

$$X = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} d\lambda, \quad Y = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d\lambda, \\ Z = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} d\lambda$$

ここに λ は波長（単位は nm）、 $S_{(\lambda)}$ は光源の放射強度の相対分光分布、 $\bar{x}_{(\lambda)}$ 、 $\bar{y}_{(\lambda)}$ 、 $\bar{z}_{(\lambda)}$ は XYZ 表色系における等色関数、 K は 3 刺激値の Y の値が測光量に一致するように定める比例定数です。色度座標 (x, y) はこの 3 刺激値から算出されます。 x 、 y と X, Y, Z の間には次の関係があります。

$$x = X/(X+Y+Z), \quad y = Y/(X+Y+Z) \quad (1.1)$$

CIE1931 色度図を Fig. 1 に示します。直線と曲線で囲まれた領域の内側が人間が見ることのできる光の範囲を示しています。この領域の外周が単色光を示しており、外周の目盛りの数字は波長を示しています。中央付近の目盛りと数値のついた曲線はその色温度の黒体輻射の発光色を示しています。大まかに言えば、この色度図で上に行くほど緑が強くなり、左に行くほど青が強くなり、右に行くほど赤が強くなります。

Fig. 1 CIE1931 表色系色度図

3 刺激値と色度座標は装置関数（分光感度）が既知の分光装置を使って分光分布を計測すれば、算出できますが、色彩輝度計を使用して直接計測することもできます。分光感度の較正には標準光源が必要なため、色彩輝度計を使う方がよいでしょう。

3.2.9 色温度

光源の発光色は色度で表現できることは前節で紹介しましたが、色温度という指標もあります。こちらはプラズマ研究者の皆さんにもおなじみの Planck の黒体輻射に基づく物理量です。ご存知のように色温度は K（ケルビン）を単位としています。蛍光ランプを初めとする放電光源の発光は黒体輻射では無いので、等色温度線を用いて色温度を求めます。

一般照明用の蛍光ランプは発光色が JIS により定められています。2,600～3,150 K が電球色、3,200～3,700 K が温白色、3,900～4,500 K が白色、4,600～5,400 K が昼白色、5,700～7,100 K が昼光色となっています。

色温度が低いと赤っぽく、色温度が高いと青っぽく見えることはよく知られていますが、色度図でみたときに発光色が黒体輻射から外れ上側にあるときは緑味が強く、下側にあるときは紫味が強くなります。

3.2.10 演色性

光源は、最終的には物体を照らして人間の目に見えるようにするものです。そのため、光源の光の質によって物体の見え方、特に色が大きく左右されます。例えば、身近な例では発光が黄色い低圧ナトリウムランプを使用したトンネルの中では色の判別が困難になります。これは低圧ナトリウムランプの発光は黄色の原子線がほとんどであるために、色の再現性が大きく損なわれていることによります。この、色の再現性を光源の演色性と言い、演色評価数 Ra で表されます。5,000 K の黒体輻射光の演色評価数を Ra = 100 とし、どの程度この光に近いかが、指標としています。演色評価数の計測・算出方法については、紙面の関係でここでは紹介できませんので、文献[6]や照明工学の教科書を参考にしてください。

CIE では用途に応じたランプの演色性を定めています。

(Table 2 参照) 一般に、黄緑色の波長成分の光を多く含むランプは効率が高くなる（人間の視感度のピークが黄緑色あたりにあるため）のですが、他の波長成分が少ないため演色性は悪くなってしまいます。反対に、各波長の光をまんべんなく含むランプは演色性が良くなる代わりに効率が悪くなってしまいます。そのため、用途に応じたランプの選択が重要になります。

一般に演色評価数 Ra が 80 以上あれば色彩の見え方に関しては実用上問題がないとされていますので、プラズマを光源に使用する場合は、Ra > 80 を目標にすると良いでしょう。

3.2.11 まとめ

本節ではごく簡単に、照明用の光源の特性について紹介しました。光源は人間の最も敏感な感覚である視覚に直結した文明の利器であり、そのために光源の性能を評価するときには比視感度に明らかなように「人間の感覚」に沿った評価をする必要があります。光源の発光効率を向上させようとしたときに純粋にエネルギー効率を上げたのでは発光効率は向上しないこともあるというのは光源研究の面白い点でもあり、また、難しい点でもあります。

もし、プラズマの光源応用、特に照明への応用を手がけられるときにはプラズマパラメータに加えて、発光効率、輝度、光束、演色性も評価の中心に考えてください。これらは先にも触れましたが、純粋な物理量ではないことに注意する必要があります。

人間工学的な要素も含んだ光源の評価指標については読者の皆さんもこれまであまり馴染みがなかったのではないかと思います。実験時にプラズマパラメータだけではなく、プラズマの光り方にも関心を持っていただければ幸いです。

参考文献

照明と光については以下の文献が参考になるでしょう。

- [1] 照明学会普及部：「新・照明教室 光源（改訂版）」第 2 章 7 (2004).
- [2] 照明学会照明普及会：「新・照明教室 照明の基礎知識（初級編）」第 2 章 5 (1996).

Table 2 光源の演色性による用途区分 (ISO 8995: The lighting of indoor work systems).

グループ	Ra の範囲	光色	推奨用途	許容用途
1A	$90 \leq Ra$	暖 中間 涼	色合わせ 診療所 検査	
1B	$80 \leq Ra < 90$	暖	オフィス, 病院	
		中間 涼	印刷, ペンキ 織物工場, 厳密な工業的作業	
2	$60 \leq Ra < 80$	暖 中間 涼	工業的作業	オフィス
3	$40 \leq Ra < 60$		ラフな工業的作業	工業的作業
4	$Ra < 40$			ラフな工業的作業

[3] 照明学会普及部：「新・照明教室 照明の基礎知識（中級編）」第 1 章 8 (1996).

物体色については次の小冊子とウェブページによくまとめられています.

[4] コニカミノルタセンシング株式会社：「色を読む話－色彩管理は「感覚」から「知覚」へ－」.

[5] [http://konicaminolta.jp/entertainment/colorknowl-](http://konicaminolta.jp/entertainment/colorknowledge/index.html)

[edge /index.html](http://konicaminolta.jp/entertainment/colorknowledge/index.html)

光の色，視覚等についてより深く学びたい場合には以下の文献が参考になるでしょう.

[6] G. Wyszecki and W.S. Stiles , Color Science (Second Edition) (Jhon Wiley & Sons, Inc. ,1982).