光源と測光

森 礼 於^{*1}

1 緒 言

今日実用されている光源の種類は非常に多く、ことに最近では各種の放電ランプについて新製品の開発に目ざましいものがある。限られた紙数でこれらの全体を述べることは困難であるので、ここでは光化学光源として応用の途の広いと考えられる主要なものに新光源を加えて、その分光特性を主体として紹介し、あわせてそれに関連する光の測定について述べる。

2 光源の発光特性

2.1 分光組成

光源は、電力等の入力エネルギーを放射エネルギーとして発光するもので、その出力としての放射束は W ($\text{joule} \cdot \text{sec}^{-1} = 0.239 \text{ cal} \cdot \text{sec}^{-1}$) の単位で表わされ、その入力に対する比を放射効率という。光源の応用では多くの場合放射の総量よりも、特定の波長域における放射束の大小が問題となる。JIS Z 8105 (色に関する用語) によれば絶対値で表わした放射の波長分布を分光組成と呼び、相対的な分布を分光分布という。光源の発光特性は通常分光分布と出力の総量である放射束 $[W]$ あるいは光束 $[lm]$ で表わされるが、ここでは光化学用という目的を考えて、その正確さに若干の問題はあっても、できるだけ分光組成の形で特性を紹介することを試みる。

図1は完全放射体の分光組成をスペクトル放射輝度 (単位面積、単位立体角、単位波長幅あたりの放射束) の形で示す。これに分光分布の近似する光源について分布温度が定義でき、また分布は等しくなくとも色 (正確には色度) の近似する光源については色温度が定義できる。

2.2 放射量と測光量

分光組成に図2のような放射の効果の分光感度を掛けて積分すると、その放射の効果に加法則が成立つという仮定の下にその数量化ができる。とくに比視感度 $V(\lambda)$ を用いて各種の測光量が定義される。表1に各種の放射量と測光量との対応およびそれらの定義式、主要な単位を示す。測光単位の基準には白金融点 (2042

図1 完全放射体の分光組成

図2 放射の各種の効果の分光感度

°K) にある完全放射体の輝度を $60 \text{ cd} \cdot \text{cm}^{-2}$ とすることで定められており、これから計算すると比視感度 $V(\lambda)$ が 1.00 (最高値) となる波長 555 nm の単色放射の 1 W は 680 lm (ルーメン) となる。測光量はこうに比視感度をもとにした特殊な単位系を持つが、その他の放射の効果についてはその分光感度を用いて等価ワットの定義ができる。紫外線の紅斑効果については、紅斑効果曲線 (図2) の最大波長である水銀の 296.7 nm 線の $10 \mu W$ と等価な放射束 (10^{-6} 紅斑ワット) を 1 E-viton という。

光源で単に効率という単位入力あたりの出力光束 ($\text{lm} \cdot W^{-1}$) を表わし、実用光源にとって最重要な特性の一つである。

表1 放射量と測光量

放射量	記号・定義	単位	測光量	記号・定義	単位
放射エネルギー	Q_e	J	光量	$Q_v = \int \Phi_v dt$	$\text{lm} \cdot s$
放射束	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光束	$\Phi_v = 680 \int \left(\frac{dP}{d\lambda} \right) V(\lambda) d\lambda$	lm
放射強度	$I_e = d\Phi_e/d\omega$	$W \cdot \text{sterad}^{-1}$	光度	$I_v = d\Phi_v/d\omega$	$\text{cd} = \text{lm} \cdot \text{sterad}^{-1}$
放射輝度	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{\cos\theta dA_1 d\omega}$	$W \cdot \text{sterad}^{-1} \cdot m^{-2}$	輝度	$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{\cos\theta dA_1 d\omega}$	$\text{cd} \cdot m^{-1}$
放射照度	$E_e = dP/dA_2$	$W \cdot m^{-2}$	照度	$E_v = d\Phi_v/dA_2$	$lx = \text{lm} \cdot m^{-2}$
放射発散度	$M_e = dP/dA_1$	$W \cdot m^{-2}$	光束発散度	$M_v = d\Phi_v/dA_1$	$\text{lm} \cdot m^{-2}$

t : 時間, ω : 立体角, A_1 : 発光面積, A_2 : 受光面積, θ : 発光面の傾き角, λ : 波長, $V(\lambda)$: 比視感度, J: ジュール, W: ワット, cd: カンデラ, lm: ルーメン

*1 Leo MORI 東京芝浦電気株式会社中央研究所: 川島市東芝町。

3 光源の実例

3.1 白熱電球

タングステンフィラメントの温度放射を利用するもので、数分の 1 W から 10 kW 以上まで多種多様のものがある。分光分布は図 1 に近似し、色温度（分布温度）の値から分光分布が推定できる。寿命 1000 時間の 100 W 電球で効率は $16 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 、色温度は 2850 K 程度である。封入ガスにヨウ素、臭素等を入れたハロゲン電球は、ハロゲンサイクルによって管壁が浄化され、フィラメントの消耗が補償されて、高効率で寿命中の光束減衰が非常に少ない。

3.2 低圧水銀ランプ

管壁最冷部の温度を約 40°C として $6 \cdot 10^{-3} \text{ mmHg}$ 程度の水銀蒸気中で放電を行なうと、入力 60% 程度が 253.7 nm の共鳴線に変換される。この放射を管外まで取出すように管壁を紫外線透過ガラスで製作した低圧水銀ランプを殺菌ランプという。30 W ランプ（管長 893 mm）の紫外線出力は約 7.5 W で 1 m の距離における放射照度は約 $0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ となる。管壁を石英ガラスで製作すると、185.0 nm 線まで放射し、空気中の酸素からオゾンを生ずる。

3.3 けい光ランプ

低圧水銀ランプの管内で発生した 253.7 nm 線を、管壁内面に塗布したけい光体によってより長波長の光に変換して発光するもので、発光の最大波長 300 nm 弱から 650 nm 強までの種々のけい光体を用いて、特定の波長域において放射効率の高いランプや、ほとんど任意の分光分布のランプを作ることができる。

図 3~5 に各種の紫外用および可視部単色けい光ランプの分光組成を示す。以下の図において、線スペクトルは 10 nm の波長幅を持たせて示し、縦座標は波長幅 10 nm についてランプから全方向に放射するスペクトル放射束の概略の絶対値を表す。従って線スペクトルについては縦座標で W の値が求められ、連続スペクトルについては縦座標を 10 で割って $\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$ の値が得られる。直管形けい光ランプでは光度 $I [\text{cd}]$ と光束 $\Phi [\text{lm}]$ の間には、

$$\Phi \approx 10 I$$

の関係が成立つので、上記の値を 10 で割るとスペクトル放射強度 ($\text{W} \cdot \text{sterad}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$) の概数が得られる。さらにその値を管軸に垂直方向から見た有効発光面積 (FL-20 S: $53 \times 3.2 \text{ cm}^2$, FL-20: $53 \times 3.8 \text{ cm}^2$, FL-40 S: $114 \times 3.2 \text{ cm}^2$, FLR-90 EH: $50 \times$

図 3 紫外用けい光ランプ (20 W) の分光組成

---: 健康線用けい光ランプ FL 20 SE
—: ケイ光ケミカルランプ FL 20 BL
.....: ブラックライトケイ光ランプ FL 20 S BLB

図 4 単色けい光ランプ (40 W) の分光組成

---: FL 40 S B —: FL 40 S BW
—: FL 40 S G : FL 40 S Pk

図 5 複写用けい光ランプ (90 W 超高出力) の分光組成

3.8 cm^2) で割るとスペクトル放射輝度 ($\text{W} \cdot \text{sterad}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$) の概数が得られる。

図 3, 4 の各ランプはそれぞれの波長域において実用的に最高な放射効率を持つランプである。このうち FL-E の管壁は紫外線透過ガラスで、FL-BL-B は管壁を近紫外線透過の黒ガラスとしたものでブラックライトと呼ばれけい光の検出に便利である。一般にけい光ランプでは高い放射輝度は得にくい、輝度を上げるために管長あたりの入力を普通形の 1.5 倍程度および 2.5 倍以上とした高出力形、超高出力形があり、図 5 の複写用けい光ランプはその例である。また反射膜によって一方向への光度、したがって輝度を増した反射形、アパーチャ形などがある、応用範囲を広げているが、高圧放電ランプで得られる輝度にはおよばない。

一般照明用のけい光ランプには、各種のけい光体を用いて高効率な白色ランプから、演色性を主体とした色評価用ランプまである。また特殊な例としては波長 400 nm 以下の紫外線の放射をほとんど 0 とした無紫外線あるいは退色防止ランプがあり、また葉緑素のスペクトル吸収率に合わせて可視部の赤と青紫とに、ピークを持つ分光分布の植物育成用ランプもある。このようにけい光ランプは放射の効果について分光感度のわかっている場合は、それに応じて有効なランプを設計できるという特長を持つ。

3.4 高圧、超高圧水銀ランプ

水銀ランプの水銀蒸気圧を 10 mmHg 以上に上げると、熱励起

による発光が増大し、185.0、253.7 nm の共鳴線は自己吸収されて発光の主要部は近紫外および可視部となる。蒸気圧 1 atm 以上では強い線スペクトルに、若干の連続スペクトルを伴い、効率も $50 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ に達し、安定長寿命なランプが得られるので高圧水銀ランプとして多用される。蒸気圧 10 atm 以上になるとスペクトル線は相当に広がり、連続スペクトル成分も増加し、効率の上昇はそれほど顕著ではないが、高輝度が得られる。この領域は超高圧水銀ランプとして実用されるが、長寿命のものは得にくいのでとくに高輝度を必要とする特殊用途に限られる。

図 6 に 400 W 高圧水銀ランプの分光組成の例を示す。一般用の水銀ランプは石英ガラス製発光管を硬質ガラスの外管内に封じた 2 重管構造となっているが、H-400 P は光化学用として発光管のみで構成され、H-400 F は退色試験用として外管を紫外線透過ガラスとしたものである。一般照明用ランプは 40 W から 2 kW までこの形式であり、外管にけい光体を塗布したものはとくにけい光水銀ランプと呼ばれる。さらに大電力用として 10、20 kW のものが最近用いられている。光化学用としては水冷使用のものがとくに製作され、小規模プラント用に 400 W から 2 kW まで、大規模プラント用に 4 kW から 40 kW までがある。これらの分光分布は若干の相違はあるが図 6 に類似している。

図 6 光化学用、退色試験用水銀ランプ (400 W) の分光組成
—: H 400 F - - - : H 400 P

図 7 は 200 W 超高圧水銀ランプの分光組成である。このランプは丸形 (外径 18 mm) の小形 (アーク長 2.5 mm) ランプで、輝度は $33000 \text{ cd} \cdot \text{cm}^{-2}$ で顕微鏡光源として利用されるが、別に細管形で焼付用の 900 W、2 kW ランプがあり、とくにテレビシャドウマスクの製造に利用される。また理化学用の 100 W 小形ランプもある。

図 7 200 W 超高圧水銀ランプ (SH 200) の分光組成

3.5 メタルハライドランプ

水銀ランプの発光管に水銀、アルゴンの他に各種金属のハロゲ

化物を封入すると特有なスペクトルを生じる。Na, Tl など強い共鳴線を持つ元素のヨウ化物を封入すると、これらの分子はアーク中で解離して原子スペクトルを生じる。図 8 は NaI, TlI, InI₃ を封入した高効率メタルハライドランプの分光組成を示す。TlI のみを水銀ランプに加えたものは緑色光 (535 nm) を効率よく発光するので、光化学用としても注目され、小規模プラント用 400 W ランプが製品化されている。

SnI₄, SnBr₂ などを封入すると分子発光による強力な連続スペクトルを放射する。わが国で開発されたもので陽光ランプとして商品化され、太陽光近似のスペクトルを高効率に放射するものとして注目されている (図 9)。

図 8 高効率メタルハライドランプ (400 W, M 400) の分光組成

図 9 すなハライドランプ (400 W, D-400) の分光組成

3.6 キセノンランプ

キセノンガス中のアーク放電により紫外から近赤外部にわたって強い連続スペクトルを生ずるランプで、常温で 8 atm 程度のガスを封入した丸形バルブからなる短アークランプと、常圧ガスを封入した細長い管からなる長アークランプとがある。

短アークランプは 150 W ~ 5 kW の各種があり、代表的な分光組成は図 10 のとおりで、効率は $25 \sim 30 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ である。陰極点の最大輝度は数十万 $\text{cd} \cdot \text{cm}^{-2}$ に達し、通常利用できる数 mm

図 10 キセノン短アークランプ (500 W, XD-500 B) の分光組成

平方の平均輝度は数万 $\text{cd}\cdot\text{cm}^{-2}$ である。模擬太陽光にも利用される。

長アークランプは 10, 20 kW などの大形のものができ、分光分布は図 10 に類似しているが、圧力が低いため線スペクトルの広がり少なく、その凹凸が短アークランプよりややばげしい。

3.7 ナトリウムランプ

ナトリウムの共鳴線 589.0-6 nm (D 線) は蒸気圧 $2\cdot 10^{-3}\text{mmHg}$ 付近で放射効率極大となる。この条件を満足するように作られたのが低圧ナトリウムランプで、二重管構造で発光管は耐ナトリウムガラスからなる。通常のもは 200 W で効率 $110\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 、D 線の放射効率 21% 程度であるが、最近では外管に赤外反射処理を施して $150\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 以上のものができている。

発光管を透光性アルミナ磁器として熱励起による発光を利用する高圧ナトリウムランプが最近開発された。線スペクトルは極端に広がって連続スペクトルを伴い、400 W ランプで効率は $105\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 程度になる。その分光組成の例を図 11 に示す。

図 11 高圧ナトリウムランプ (400 W) の分光組成

3.8 カーボンアーク

歴史的に最古の実用光源であって、今日では次第に新種放電ランプに置換えられているが、なお相当に実用されている。低輝度 (純炭素) アーク、高輝度アーク、フレイムアーク等の別がある。高輝度アークは陽極芯にセリウム化合物を入れ、火坑中の蒸気を光源とするもので、分布温度 $5500\sim 6500\text{K}$ の星光に近い発光を示し、効率 $30\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 、輝度 $10^5\text{cd}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度のものまでである。フレイムアークは種々の発光剤を用い、フレイムの発光を利用するもので、目的により各種の分光分布のものがある。

4 光 の 測 定

4.1 分光測定

光源の分光分布の測定は原理的には図 12 のような配置によって行なわれる。分光器出口スリットの外に高感度の光電照度計をおき、入口スリットの前に拡散白色板をおいて、これを標準と試料の光源で交互に照射して照度計の出力を読むと、試料と標準との分光分布の比が求められる。これに標準光源の分光分布を掛けて試料光源の分光分布が求められる。標準には一般に CIE 標準光源 A (色温度 2854K で点灯したガス入りタングステンコイル電球で、その分光分布は完全放射体に一致すると仮定する) が用いられる。標準光源に光度 $I_v[\text{cd}]$ の校正値がつけられてい

図 12 光源の分光分布測定方法

ば、その波長 560 nm におけるスペクトル放射強度 $I_{e,560} [\text{W}\cdot\text{sterad}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}]$ は次式で表わされ、試料光源の分光組成の算出も可能となる。

$$I_{e,560} = I_v / 680 \cdot \int P_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda \approx 2.07 \cdot 10^{-5} I_v$$

ここで $P_A(\lambda)$ は 560 nm を 1 とした標準光源 A の分光分布、 $V(\lambda)$ は比視感度である。

4.2 照度および放射照度の測定

受光器の分光感度を比視感度に近似させて出力が 1x 目盛で校正された照度計としては、全目盛数千 1x の簡易形から 10^{-4}lx 程度まで測れる高感度形 (極微照度計) ままで市販されている。一般には照度計で測定された照度 $E_v[\text{lx}]$ から放射照度 $E_e[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$ を推定することはできないが、試料光の分光分布 $P(\lambda)$ がわかっているときに限ってつぎの関係で求められる。

$$E_e = E_v \int P(\lambda) d\lambda / 680 \cdot \int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

光化学反応と関連の深い放射量の測定には $300\sim 400\text{nm}$ の波長域にのみ感度を持つ紫外線照度計 (正確には放射照度計) が有効であって、この種の計器も開発されている。この種の計器で測定された $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ に関連する数値を光化学効果の表示に用いるときには、装置の分光感度とその効果の分光感度との相違について留意する必要がある。

全波長域にわたる放射照度を直接に測定するには熱電受光器が適している。この種の素子を利用した新しい装置として光合成有効日射計がある。熱電堆にフィルターを組合わせて $380\sim 710\text{nm}$ にはほぼ平坦な分光感度特性を持ち、その出力でモータを回転して回転計によって積算放射照度 (放射エネルギー) を $\text{g}\cdot\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}$ の単位で表示し、また記録計によって放射照度の変化も記録することができる。このような装置はフィルターの選定によって相当に任意な分光感度を持たせることができ、その分光感度はほとんどフィルターのみによって定まるので、安定な色ガラスフィルター等の利用により、分光感度の器械間の差異も少範囲におさめられ、今後光化学用の積算放射照度計として活用される可能性がある。