総 論

An Introduction of Radiometry and Photometry

1934年12月15日生まれ、1957年3月東京都立大学工学部電気工学科卒業。同年4月㈱リコー入社。1965年4月埼玉大学助教授、現在同大学教授(工学部電気電子システム工学科)、電気電子計測、計測データ処理、オプトエレクトロニクスの講義担当。1968年工学博士

専門会員 中 川 靖 夫
Yasuo Nakagawa

◀キーワード：放射測定，測光，測色，分光放射測定

1. 光放射の形態

光放射のパワーを工業用途などに利用しようとするときには、光放射が波長、空間、時間の3パラメータをもった量であって、それぞれの領域に対して、互いに独立に広がり (range, area) あるいは変動 (modulation) を示す電磁エネルギー (パワー) であることを念頭におかなくてはならない。光放射を考えるとときには、波長に関する特性が光源の色のような形で顕著に表れるので、最も関心の対象になることが多いが、実際の応用面では光源の形状や照射の距離などの空間への発散の状態 (光の空間的経路の捉え方)、受光する面の形状や大きさなどの空間的な要因が非常に重要である。また、時間的な変動 (規則的、不規則) に対する考慮も欠くわけにはいかない。

2. 光放射の測定の意味と現状⁽¹⁾⁽²⁾

光の測定に限らず、一般に測定と云う行為は、目的に対する明確な認識を持って、それに沿って行えばうまく行くものである。逆に目的に対する認識の明確でない測定は、いかに精微に行ってもよい結果に到達することは難しい。例えば、人間の視感による明るさを物理的なセンサーで測定・評価しようとする目的であれば、センサーの応答の波長特性を人間の視覚の波長特性である分光視感効率 $V(\lambda)$ に合わせて行うことでよい結果を得ることができる。しかし、漠然と光に応答すればよいとだけ考えて波長特性を考慮しないでセンサーを用いるならば、いかに細かい測定を行ってもこの目的に対して満足な結果を得ることはできない。

空間的な問題についても同様であって、例えば紫外放射による光アッシャー (光洗浄) などでは、長い管状の放電ランプの直近に置いた対象物への入射を測定しなければならないが、このようなときにはセンサーに斜方向から強い照射が入るので、この目的を満足するためにはセンサーの入射角度特性が広い範囲で余弦特性に追随していなければならない。

放射測定、測光は後述するような理由から光源の発光そのものを測ることのように理解されがちであるが、それは現象の一面であって、照明工学のような光放射のパワーの応用を考える立場では、放射測定とは「物質や生体などが光放射によって作用を受けるとき、その作用に有効な光放射パワーの量を定量的に評価すること」であ

る。そして、この作用の波長特性を $S(\lambda)$ とすると (作用が人間の視覚ならば $S(\lambda) = V(\lambda)$ である)、放射測定で評価する量 Φ は、

$$\Phi = \int_{\lambda} \int_{\theta} \int_t S(\lambda, \theta, t) \cdot E(\lambda, \theta, t) \cdot d\lambda \cdot d\theta \cdot dt \quad (1)$$

である。ここで $S(\lambda, \theta, t)$ 、 $E(\lambda, \theta, t)$ は作用を受ける側 (受光側) と作用を施す側 (光源) がいずれも、波長 λ を変数とする波長的、空間の方位角 θ を変数とする空間的、時間 t を変数とする時間的な変動量であることを表す。従って、放射測定、測光で得ようとする量は上の三重積分による値である。現在一般に行われている放射測定では、時間的な変動は測定時間を短くとり、あるいは時間的な変動が周期的であればその整数倍をとることで、一定とみなして処理することができる。また、空間的な問題は光源と受光面との相互関係を定式化すればこれも定数とみなすことが可能である (種々の照明計算の公式はこの定形化を実現したものである)。波長的な問題は単純な定式化 (一般化) が困難であるため、放射測定の主要変数として残されるが、もし、 $S(\lambda) \equiv V(\lambda)$ とみなし得るならば、分光応答特性が $V(\lambda)$ に等しいようなセンサーを用いることで、任意の波長特性 (分光分布) をもった光源に対して、波長の変数を解消して、 $V(\lambda)$ による評価量を得ることができる (これが「測光」である)。測光と放射測定の違いは波長的な評価規準が $V(\lambda)$ であるか、それ以外の量であるかの違いであって、空間的、時間的な問題は全く共通である。この観点から、光源単独の放射測定は分光応答度一定のセンサーを対象としたものであると云うこともできる。

現在の放射測定 (測光、測色) 技術は、元来3パラメータ測定である放射測定の空間的、時間的要因を、単純定式化して、主として波長的要因を精微に追求してきたとも云えるであろう。そして、その対象を視感度特性 $V(\lambda)$ 等色関数、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ とした限りでは非常に大きな成果をあげてきた。しかし、波長特性が上記の関数以外である作用を対象としたとき、あるいは、いわゆる照明の場以外の空間的な場 (前述した光洗浄の照射面などがその一例である) に対する放射測定の対応は使用者の満足を得ているとは云い難い状況にある。

3. 放射測定の問題

3.1 波長的な問題——分光放射測定

前述のように、光放射パワーの代表的な作用は、物質や生体などへの光反応（電離、励起、分解、結合など）である。光反応は光の吸収があつてはじめて成立する。大部分の光反応は光の波長に対して選択的であり、一般にかなりの波長的広がりを持つ。この反応の波長特性を分光応答（分光感度） $S(\lambda)$ と呼ぶことは既に述べた。そして、太陽光や通常の人工光源のように波長的な広がり（分光分布） $P(\lambda)$ を持った光放射による反応の度合い、 W は、空間的及び時間的な要因を定数 K とみなすなら、 $P(\lambda)$ と $S(\lambda)$ の積の波長的積分に比例する。

$$W = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot P(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

測光量、色に関する測定量はすべてこの積分量である。従つて、目的とする作用の分光応答特性と完全に相似な分光応答度を持ったセンサーがあれば W は直接求めることができる。照度計はこれを実現しようとする計器であるが、技術的な制約からその正確さは十分であるとは云えない。

そこで、測光・測色の立場では、視感度特性 $V(\lambda)$ 等色関数、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ が波長毎の数値として国際的にも規約されていることを利用して、光源の分光分布 $P(\lambda)$ だけを分光測定技術によって測定して、その結果とすでに与えられている $V(\lambda)$ などの値について波長的な数値積分を行つて目的を達成しようとする。これが現在の分光放射測定技術の実態である。このときに必要なのは、波長的な積分量を正しく求めることで、そのための必要条件は、波長（横軸）分解と振幅（縦軸）の精度がうまくバランスして、その積が正しく評価できることである。分光的な測定で波長分解をきびしく追求することは分光学（spectroscopy）の重要なテーマではあるが、ここで述べる分光放射測定（spectroradiometry）の立場とは必ずしも一致しない。それは、分光放射測定が、波長的な広がりをもつ放射パワーを計測するための手段だからである。

分光放射測定をするときに必要な波長分解の程度は、分光分布 $P(\lambda)$ と分光応答 $S(\lambda)$ のフーリエスペクトラム（波長 λ の逆数である空間周波数 λ^{-1} に対する $P(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$ の裏関数 $P(\omega)$ 、 $S(\omega)$ ）を考えるとよく理解できる。ここで、 $P(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$ と裏関数 $P(\omega)$ 、 $S(\omega)$ の関係は下記のようになる。

$$P(\omega) = \int_0^{\infty} P(\lambda) \exp(-j\omega\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} S(\lambda) \exp(-j\omega\lambda) d\lambda \quad (4)$$

この、 $P(\omega)$ と $S(\omega)$ は、 $P(\lambda)$ と $S(\lambda)$ のフーリエ係数

の周波数特性である。これは、 $P(\lambda)$ と $S(\lambda)$ が λ を変数とすると信号の波形であると考えて、その波形分析を、 λ の逆数 ω について行なつて、基本波、第二高調波、第三高調波、……の周波数的なつらなりである $P(\omega)$ 及び $S(\omega)$ を求めることである。信号の波形分析では、もとの波形が単調な形であれば、高調波成分が少ないことはよく知られている。図1の a, b は Xe ランプの分光分布と $V(\lambda)$ であるが、このフーリエ変換スペクトルは、図2のようになり、 $V(\lambda)$ に対応する $S(\omega)$ が早くゼロになる。そして(3)式と、(4)式の $P(\omega)$ 、 $S(\omega)$ の間には、(5)式のような関係がある（Parseval の等式）。

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} P(\omega) S(\omega) d\omega \quad (5)$$

ここで、 $\bar{P}(\omega)$ は $P(\omega)$ の共役複素数であるが、その振幅

図1 複雑な放射スペクトルと単純な作用スペクトルの作用関数の組合せ

図2 フーリエ変換したスペクトル

は $P(\omega)$ と同じであるから、以下に述べるのが $P(\omega)$ についても成立する。

この(5)式の右辺の積分の範囲は、 $P(\omega)$ 、 $S(\omega)$ どちらか一方がゼロになるまでである。図2から分かるように、 $S(\omega)$ の方が早くゼロになるので、この上限空間周波数を ω_0 とすると、 $\omega \geq \omega_0$ では $P(\omega)$ がいかに大きくても、 $S(\omega)$ がゼロであるので、 $P(\omega)$ と $S(\omega)$ の積には ω_0 よりも高い空間周波数成分が含まれないことになる。

換言すると、(5)式の右辺の計算には ω_0 より高次の空間周波数成分は不要である。そして、この上限空間周波数 ω_0 は次のように分光放射測定の変換と対応する。いま、 $P(\lambda)$ と $S(\lambda)$ の積を $F(\lambda)$ 、そして $P(\omega)$ と $S(\omega)$ の積を $G(\omega)$ とすると、 $F(\lambda)$ と $G(\omega)$ はフーリエ変換対であり、 $G(\omega)$ には前述のように ω_0 より高次の成分は含まれていない。一方、この変換対で、 $F(\lambda)$ の関数形を決定するための λ に関するサンプリング間隔 $\Delta\lambda$ は、 $F(\lambda)$ のフーリエ変換 $G(\omega)$ の上限空間周波数 ω_0 に対して次の関係を持つ (サンプリング定理)。

$$\Delta\lambda = 1/(2\omega_0) \quad (6)$$

この $\Delta\lambda$ は、 $P(\lambda)$ を測定する波長間隔である。つまり、対象に作用する光放射パワー W を求めるための、波長に対する数値積分の間隔 $\Delta\lambda$ は、対象の分光応答特性 $S(\lambda)$ のフーリエ変換 $S(\omega)$ の上限空間周波数 ω_0 の逆数の1/2に等しくなる⁽³⁾。

この $\Delta\lambda$ の具体的な値は、 $S(\lambda)$ の形によって異なるが、視覚、色覚に関する波長的な関数 $V(\lambda)$ 、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ については、通常は5 nmと考えてよく、非常に精密に測る場合でも2.5nmでよい⁽⁴⁾。他の光効果 (例えば、光合成、紅斑効果など) の $S(\lambda)$ を考えた場合でも、この値は大体適用できる。なお、実際に分光放射測定を行うときには、モノクロメータなどの分光装置の帯域幅 (スリット幅) を測定波長間隔と合せる操作が必要になるが、これについては本特集の分光計測技術の稿で触れられるのでここでは省略する。

3.2 空間的な考え方

人工光源は種々の理由から多種多様な形状をしていて、光の空間への発散の状態 (配光) も多種多様である。また、光を受ける側も平面であるとは限らず、位置的にも水平あるいは垂直とは限らない。また、物体の表面の反射や吸収の状態は、光の入射角で変化することが多い。従って、物体に光が入射して反応に寄与する量を正しく評価するためには、入射する光強度の角度分布を正しく知らなくてはならない。そのためには、光源の配光 (形状である程度決まる) と受光面の入射角度特性、及びそれらの相互の位置的な関係が分っていなければならない。そして、測定器はその入射角度特性が測定対象となる受光面のそれと合致していなければならない。

放射源の基本的な形は点光源である。これは全空間の

あらゆる方向 (立体角 4π ラジアン) に均一な光放射を発する。このとき、光源から距離 L 離れた、ある一定面積 A の受ける放射の量 E は $E \propto L^{-2}$ となる (逆二乗の法則)。しかし、現実使用する光源は点ではなく、面積をもっている。面状あるいは棒状の光源から空間へ放出される光の分布 (配光) は、点光源の場合のように均一ではない。したがって、作用を受ける面と光源の、相互の空間における位置関係によって、受光面に入る放射の量が異なってくる。例えば図3のように棒 (線) 状の光源から距離 L だけ離れた面上の位置 P_1 と P_2 では、受ける入射光の量がかなり異なる。いま、光源の発光の強度が長さ H に沿って均一であれば、これを同じ強さの点光源が連続したものともみることができる。すると、 P_1 にある微小面 A に入る光の強さは、 P_1 の真上の点 S_1 からの分が最も大きい。末端の点 S_2 からは距離が遠くなるために小さくなる。今、 S_1 から P_1 へ入る光の強さを1として、 S_1 と P_1 間の距離を L とすると、 S_2 と P_2 間の距離 L' は(7)のようになる。

$$L' = 1 / (L \cos \theta_1) \quad (7)$$

そして、 S_2 から P_1 へ向う光のパワーは、 S_1 からの分に比べて、 $(L/L')^2 = (\cos \theta_1)^2$ になる。ここで更に微小面 A に入る光の量 (あるいは P_1 点での光の入射の密度……つまり照度) とその入射の角度の関係を考えてみる。

図4のように幅 A に対して、面に直角な方向 (法線) から均一な光が入った状態と、この面が法線に対して角度 θ で傾いた場合を考える。図から分かるように面が傾いたときは、光を受ける幅が短縮されて、 $A \cos \theta$ になる。つまり、一定面積に入る光の量は、入射角 θ の余弦に比例する (余弦の法則)。したがって、図3で S_2 から A に入る光の量 E_2 は、 S_1 からの分 E_1 に比べて、

図3 大きさのある放射源からの空間への放射密度

図4 入射面に入る放射の量と入射角の関係(余弦の法則)

$E_2/E_1 = E_1 (\cos \theta)^2 \cdot \cos \theta = E_1 (\cos \theta)^3$ (8)
 になってしまう。もし、 $\theta_1 = 30^\circ$ とすると、 E_2 は E_1 の約2/3になる。そして光源全体から入る量 E は、

$$E = 2E_1 \int_0^{\theta_1} \cos^3 \theta d\theta$$
 (9)

のようになる。もし、 A が P_2 の位置にあるとすると、そのときの入射の量 E' は(10)のようになる。

$$E' = \int_0^{\theta_2} E_1 \cos^3 \theta d\theta$$
 (10)

いま、 $\theta_1 = 30^\circ$ とすると、 E'/E は約0.75である。このように光源に対向する面でも位置や入射角の状態によって、入射するパワーは大変に異なるものである。つまり、光を正しく測定するためには測定面の空間的配置を目的に適したように保つことが非常に重要なのである。

なお、(9)、(10)式は光源の配光が均等で、受光面(受光器)の入射角特性が $\cos \theta$ であるときで、光源の配光が $\alpha(\theta)$ 、受光器の入射角特性が $\beta(\theta)$ ならば(9)式は、

$$E = 2E_1 \int_0^{\theta_1} \cos^2 \theta \alpha(\theta) \beta(\theta) d\theta$$
 (11)

となる。一般の照明計算の式は、 $\alpha(\theta) = \beta(\theta) = \cos \theta$ として極座標を直角座標にして定式化したものが多い。

3.3 放射の時間的な要因

自然の光(太陽光など)は天候によって時々刻々変化するが、人工的な光源もまた状態によって放射が変動する。光源の時間的な変動は、短時間(秒～分単位)のものと長期間(時間～日単位)のものに分けられる。短時間のものの主な原因は、a)電源電圧、周波数の変動 b)周囲温度の変動 c)放電電極の変動 などである。a)はとくに電球に対して重要で、一般の電球での可視域の放射の変動は、電圧の3～4乗に比例する。つまり電圧1%の変動は光出力3～4%の変動をもたらす。b)は蛍光灯に対して重要で、室温附近での5℃の温度変動は2～3%の光出力変動になる。c)はHIDランプ(水銀ランプなど)で重要で、管電流、管電力を一定に保つても、数%の不規則な変動が起ったり、点灯ごとに光出

力レベルが異なったりする。これらの変動は、それをもたらす原因を予測して制御することが困難であるために、測定の正確さを保証するためには多数回の測定による統計処理が必要になる。

また、パルス光(閃光)のような単発的で短時間に急激な変化をする発光を測定するときは、その目的が何であるのか、例えば a)ピーク値、b)時間的な変化の状態、c)平均値(または積分量)のいずれを測るのかによって測定装置の時間的な特性が大きく異なるので、要求に対する十分な理解が必要になる。

光の測定では、以上のような3パラメータについて、測定目的に対する関わりとその影響を十分に吟味しないで行くと、信頼性のある結果は得られない。

4. これからの放射測定の展開

以上に述べたように、現在の放射測定(測光)技術は、光源全体からの空間的に平均化あるいは積分された量(全光束や光度など)を対象として、ある面積に入射する放射の空間的な平均あるいは積分を波長的に評価するものである。そして、その対象を狭義の照明に限るならば技術的な完成度・満足度はかなり高いであろう。しかし、対象をディスプレイのような空間での二次元的分解(画像分解)に対応する測定は膨大な手間と時間を必要として到底実用に堪えないからである。また、ディスプレイは動的なものであるから、測定時間の制約も今までの観念とは異なったものとならざるを得ないであろう。

以上のことを別の表現で述べるならば、放射測定・測光(測色)技術は動的なカラー画像の評価にどのように関わるかということである。私見では、この問題に対して放射測定・測光技術が十分に関わることはできなければ、放射測定・測光は古典的技術として終焉を迎えざるを得ないであろう。

楽観的に考えれば、この対応は測定機器(ハードウェア)の進歩で解決できるかも知れない。しかし、問題の本質に今までの放射測定・測光では考えに入れていなかった空間的な二次要素、時間的な変動要素が含まれることは明白であるから、放射測定・測光の根本理念(パラダイム)までさかのぼった見直しが必要になるのではなかろうか。

参考文献

- (1) 照明学会編：光の計測マニュアル 第2章，日本理工出版会(1990)
- (2) 中川靖夫：「光放射の測定の考え方」，照学誌，70-4，pp. 160-165 (1986)
- (3) 中川靖夫：「線スペクトルを含む放射源の分光放射測定と評価」，照学誌，61-7，p.388 (1977)
- (4) 渡会吉昭：「分光放射測定の一般化に関する基礎的原理」，照学誌，61-7，p.376 (1977)