■やさしい照明技術■

光源の量子効率と発光効率(1)

Quantum Efficiency and Radiation Efficiency of Radiation Sources (1)

1934年生．1957年東京都立大学工学部電気工学科卒．1968年工学博士．現在，埼玉大学名誉教授．著書「光の計測マニュアル」など．

名誉会員　中　川　靖　夫
Yasuo Nakagawa

◀キーワード：外部量子効率，内部量子効率，エネルギー効率，LED，蛍光，励起

1．はじめに

LEDや有機ELのような固体照明素子（SSL）の照明用光源としての実用化が進展するにつれて，その発光のエネルギー効率と量子効率の関連が話題になってきている．

量子効率という概念は，一般の照明技術者にとっては，光源材料である蛍光体の特性としての認識はあっても，それが光源一般に普遍的に適用されるものではなかったので，LEDなどの量子効率が，最終的にlm/Wで評価される光源の効率とどのように結びつくのか考えあぐねているのが実情かと思われる．この事情はSSLの開発側である固体材料技術者の側でも同様であって，ここではいわば，照明技術者の立場を裏返した形で，lm/Wと量子効率の橋渡しをどのように考えるかに困惑が見られている．

このような事情の根底にあることの1つには，「効率」についての認識の相違と混乱があると思われる．つまり，量子効率(quantum efficiency)と光源効率(luminous efficacy)は同じ「効率」でも，そのコンセプトはかけ離れていて，一方だけの理解では他方の理解は困難なのである．

本稿では，このような実情の解消の一助として，LED，蛍光体について量子効率と光源効率のつながりを数理的に解説し，あわせて量子効率の測定法と実測データを紹介する．

2．エネルギー効率と量子効率

2.1　光源のエネルギー効率

光源のエネルギー効率は，入力した電気エネルギー[*1)]など(J, W)に対する出力放射エネルギーの比(%)である．この放射出力は電磁波としての可視域を含む，紫外から赤外までの放射エネルギーであって，これを照明用光源としての効率として評価するには，視感による波長的な重み付け(V(λ)を乗じること)を行わなければならない．周知のように視感による明るさ評価の単位はlmであり，1 lmは波長555nmで1/683(放射)Wである．

したがって，光源の視感に対する効率は，入力のWと出力lmの比（lm/W）である[*2)]．元来，効率（efficiency）の概念は分母（入力）と分子（出力）の次元（単位）が同じである無次元量である．しかし，光源効率の場合は次元を持つ量であって，しかもその量が人間の感覚に基づく重み付けがされたものである．したがって，efficiencyと異なるefficacyという用語を用いて区別している（efficacyは「効果」という意味である）．

この光源「効率」はエネルギー効率の一種ではあるが，その概念はいわば照明関係者の約束ごとであって，普遍的な物理概念からは外れているので，当事者以外には簡単に受け入れにくいことを留意しなければならない．

2.2　量子効率

2.2.1　量子効率の定義

物質を分割していって，その物質としての性質を維持できる最小の構成単位は，分子または原子である．同様にエネルギーの最小の構成単位（量子：概念的には粒子のようなもの）は，電気の場合は電子であり，光の場合は光子である．したがって，電気エネルギーが光エネルギーに変換されるとき，入力した電子の数に対する出力する光子の数の比（無次元量：%）を考えることができる．これが量子効率である．

この量子の持つ素エネルギーは，電子の場合は電気エネルギーの形態（交流，直流の別，周波数など）にかかわりなく一定の電荷eであるが，光子の場合はhc/λ（hはプランクの定数，cは光の速度，λは光の波長）であって，光の波長が短くなるほど光子の持つ素エネルギーが大きくなる．

2.2.2　光子エネルギーと量子効率

エネルギーの量は量子の数に比例するので，電気・光変換のときは，量子効率が一定（電子の数と光子の数の比が一定）であっても発生する光の波長が2倍の長波長であれば，エネルギー効率は1/2になる．また，エネルギー効率が一定(電気エネルギーと光エネルギーの比が一定)であっても発生する光の波長が1/2になれば，量子効率は1/2になる．

また，蛍光発生のような，光から光へのエネルギー変換では，量子効率（蛍光を励起する光子数と発生した蛍光の光子数の比）が同じでも，励起光の波長と蛍光の波長が離れていれば，エネルギー効率が低く，接近してい

＊1）エネルギーの単位はJであるが，エネルギーの単位時間量である，パワー　W=J/sの方が広く用いられるので，本稿では便宜的にWを用いておく．

＊2）このWは前述の(放射)Wまたは(入力電力)Wの2種が考えられるが，通常は(入力電力)Wである．

ればエネルギー効率は高くなる．例えば，254nm の水銀放電発光で励起して，波長550nm 付近の可視域の緑波長を発光する蛍光体と，青色 LED の460nm 発光で励起して，550-600nm の黄色を発光する蛍光体では，量子効率が同じであっても，エネルギー効率は青色 LED 励起の方がかなり高くなる．

2.2.3 内部量子効率と外部量子効率

蛍光体の励起発光の場合，励起光は総て蛍光体に吸収されるわけではなく，一部分は表面で反射してしまう．また，吸収された放射も一部は熱その他の発光以外に費やされる．

この，いったん吸収された光子の数と発光する光子の数の比を内部量子効率とよび，表面を照射した（反射分を含む）光子の数と発光した光子の数の比を外部量子効率とよぶ．単に量子効率という場合にこのどちらを指すのか，必ずしも明らかでないので，混乱することがある．一般に研究者的な立場では内部量子効率を指し，実用的な観点では外部量子効率を指すことが多いようである．光源としての実用的観点から重要なのは外部量子効率である．本稿での「量子効率」は特に断らない限り外部量子効率である．

3．量子効率と光源効率の相互関係

3.1 基本的な物理量の確認

個々の事例に入る前に，光子と電子に関連した物理量の概念を念頭におく必要があるので，やや煩わしさがあるが，それらを列挙しておく（分かっている方は飛ばして結構である）．

(1)光子の素エネルギー

$$e_p=\frac{hc}{\lambda}=\frac{1.9858\times10^{-16}}{\lambda}\ [\mathrm{J/nm}] \quad\cdots\cdots(3.1.1)$$

h：プランクの定数　$h=6.626\times10^{-34}[\mathrm{J\cdot s}]$

c：光の速度　$c=2.997\times10^{8}[\mathrm{m/s}]=2.997\times10^{17}[\mathrm{nm/s}]$

λ：光の波長［nm］

(2)光子エネルギー e_p と放射パワー P の関係

$$P=N_p\cdot e_p=N_p=\frac{1.9858\times10^{-16}}{\lambda}\ [\mathrm{W}] \quad\cdots\cdots(3.1.2)$$

N_p：単位時間に発生する光子の数［個 /s］

(3)波長 λ_0 の（単色）放射の単位パワー（1 W）当たりの光子数

$$N_p=P\cdot\lambda_0\times0.50357\times10^{16}\ [個] \quad\cdots\cdots(3.1.3)$$

(4)波長的な広がり（分光分布）のある放射パワー $P(\lambda)$ での光子の波長的な広がり $N_p(\lambda)$

$$N_p(\lambda)=\frac{hc}{\lambda}P(\lambda)=\lambda P(\lambda)\times0.50357\times10^{16}\ [個/\mathrm{nm}] \quad\cdots\cdots(3.1.4)$$

したがって，光子の広がりの総数は次のようになる．

$$N_p=\int_0^\infty N_p(\lambda)d\lambda=0.50357\times10^{16}\int_0^\infty\lambda\cdot P(\lambda)d\lambda\ [個] \quad\cdots\cdots(3.1.5)$$

$P(\lambda)$：放射パワー（放射束）の分光分布［W/nm］

(5)電流 I と単位時間に発生する電子の数 N_e の関係

$$I=e_e\cdot N_e=N_e\times1.6022\times10^{-19}\ [\mathrm{A}] \quad\cdots\cdots(3.1.6)$$

e_e：電子の素電荷　$e_e=1.6022\times10^{-19}$［C］

N_e：単位時間に発生する電子の数［個 /s］

(6)単位電流（1 A）当たりの電子の数　N_{e0}

$$N_{e0}=\frac{1}{e_e}=6.2414\times10^{18}\ [個] \quad\cdots\cdots(3.1.7)$$

3.2 発光の量子効率

基本量から以下のように発光についての量子効率を導くことができる．

3.2.1 電子（電流）による励起（有色 LED など）

入力する電子の数を N_e，発生する光子の数を N_p とすると，量子効率 η_e は，次のようになる((3.1.5)～(3.1.7)式)．

$$\eta_e=\frac{N_p}{N_e}=\frac{\int_0^\infty\lambda\cdot P(\lambda)d\lambda\times0.50357\times10^{16}}{I\times6.2414\times10^{18}} \quad\cdots\cdots(3.2.1)$$

3.2.2 光子（放射）による励起（蛍光体など）

励起放射の光子の数を N_{ex}，発生する光子の数を N_p とすると，量子効率 η_p は，次のようになる（(3.1.3) (3.1.5)式）．

(1)励起放射が単一波長 λ_0 のとき（蛍光ランプなど）

$$\eta_p=\frac{0.50357\times10^{16}\int_0^\infty\lambda_0\cdot P(\lambda)d\lambda}{\lambda_0\cdot P_{ex}\times0.50357\times10^{16}} \quad\cdots\cdots(3.2.2)$$

P_{ex}：励起放射パワー［W］

$P(\lambda)$：発生（蛍光）放射の分光分布［W/nm］

(2)励起放射が波長的な広がりを持つとき（白色 LED など）

$$\eta_p=\frac{\int_0^\infty\lambda\cdot P(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\lambda\cdot P_{ex}(\lambda)d\lambda} \quad\cdots\cdots(3.2.3)$$

$P_{ex}(\lambda)$：励起放射の分光分布［W/nm］

λ_1，λ_2：励起波長の下，上限［nm］

3.2.3 電流による励起と光子による励起が並存するとき（白色 LED など）

(1)電流による励起放射がすべて蛍光発生に寄与するとき

この場合の量子効率を $\eta_{e,p}$ とすると次のようになる．

$$\eta_{e,p}=\eta_e\cdot\eta_p=\frac{N_{ex}}{N_e}\cdot\frac{N_p}{N_{ex}}=\frac{N_p}{N_e} \quad\cdots\cdots(3.2.4)$$

(2)電流による励起放射の一部が蛍光発生に寄与するとき

電流による励起光子数を N_{ex} として，それが蛍光発生に寄与する割合を A 〈1＞A＞0〉とすると，最終的な光

出力の光子数 N_p は次のようになる．

$$N_p = \eta_p N_{ex} A + N_{ex}(1-A) \quad \cdots\cdots (3.2.5)$$

ここで，$N_{ex} = \eta_e N_e$ であるから，量子効率 $\eta_{e,p}$ は次のようになる．

$$\eta_{e,p} = \frac{N_p}{N_e} = A\eta_e\eta_p + (1-A)\eta_e \quad \cdots\cdots (3.2.6)$$

しかし，係数 A は実際問題としては求めにくいので，励起放射の直接出力成分と蛍光出力を一括して考えて，(3.2.1)式で処理するのが現実的であろう．

3.3 量子効率とエネルギー効率

このようにして求めた量子効率が，エネルギー効率あるいは光源効率とどのように結びつくかを検証してみる．なお，光源のエネルギー効率 η_r(%) と光源効率 η_v (lm/W) は以下のとおりで，分母 P_0(W) は LED の場合は順方向電圧 V_f(V) と電流 I(A) の積である．

$$\eta_r = \frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{P_0} \qquad \eta_v = \frac{Km\int_{360}^{830} V(\lambda)P(\lambda)\,d\lambda}{P_0}$$

P_0は一般の光源では，入力電力であるが，蛍光発光が介在する場合は分母を励起放射パワー P_{ex}(W) とした光源のエネルギー効率 $\eta_{r,ex}$(%) と光源効率 $\eta_{v,ex}$(lm/W) も考える必要がある．本稿ではこの場合には，P_{ex} のように添え字を ex としている(＊２)参照)．

(1)電子（電流）による励起の場合

量子効率 η_e は(3.2.1)式から，以下のようになる．

$$\eta_e = \frac{N_p}{N_e} = \frac{\int_0^\infty \lambda\cdot P(\lambda)\,d\lambda \times 8.0682\times 10^{-4}}{I}$$

$$= \frac{K_e\int_0^\infty \lambda\cdot P(\lambda)\,d\lambda}{I} \quad \cdots\cdots (3.3.1)$$

これから，対象を LED としたとき，エネルギー効率は次のように求められる．

$$\eta_r = \frac{K_e\int_0^\infty \lambda\cdot P(\lambda)\,d\lambda}{I} \cdot \frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{V_f\cdot K_e\int_0^\infty \lambda\cdot P(\lambda)\,d\lambda}$$

$$= \frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{V_f\cdot I} \quad \cdots\cdots (3.3.2)$$

量子効率からエネルギー効率を導く係数(式の第２項)は発光の分光分布で決まるので，電流によって相対分光分布が変動しなければ，量子効率とエネルギー効率は比例関係にあることが分かる．このことは，光源効率の場合でも同じである．

(2)光子（放射）による励起の場合

この場合は励起に寄与する光子の数が同じでも，励起エネルギーが放射の波長によって異なるので，電流励起のように量子効率から一義的にエネルギー効率を導くことはできない．

いま，励起放射パワー P_{ex} が単一波長λ_0であるとすると，励起パワーと蛍光出力の間のエネルギー効率 $\eta_{ex,r}$ は次のようになる（式(3.1.1) (3.1.2)）．

$$\eta_{ex,r} = \frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{P_{ex}} = \frac{\lambda_0\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{N_{ex}\cdot h\cdot c} \quad \cdots\cdots (3.3.3)$$

したがって，これと量子効率 $\eta_p = N_p/N_{ex}$ との関係は(3.3.4)式のようになって，η_p が同じでも，λ_0が大きい(波長が長い）ほどエネルギー効率がよくなる．ただし，λ_0は蛍光発光の波長より長くなることはない（ストークスの法則）．励起放射に広がりのあるときは，(3.3.5)式のようになり，励起波長帯が長波長になればエネルギー効率は向上する．

$$\eta_{ex,r} = \frac{N_p}{N_{ex}}\cdot\frac{\lambda_0\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{N_p\cdot h\cdot c} = \frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{P_{ex}} \quad \cdots\cdots (3.3.4)$$

$$\eta_{ex,r} = \frac{N_p}{N_{ex}}\cdot\frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{h\cdot c\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{N_{ex}(\lambda)}{\lambda}\,d\lambda} = \frac{\int_0^\infty P(\lambda)\,d\lambda}{P_{ex}} \quad \cdots (3.3.5)$$

ここで，λ_1，λ_2は励起放射波長の下限と上限，$N_{ex}(\lambda)$ は励起放射の光子の波長的な広がりである((3.1.4)式)．

4．応用と実際例

以上のことを実際的に応用した例として，LED の全光束から量子効率を導いてみる．これまでに述べた諸項目から，量子効率を求めるためには，光源の分光分布（分光放射束（W/nm））が必要なことが分かる（(3.2.1)～(3.2.3)式）．しかし，現行の測光方式では，光源の全光束は全光束標準と V(λ)受光器で測り，分光分布は光色の評価のために相対値で求めるのが一般的で，LED 測光法の規格である JIS C 8152でもこのことを前提としている．このような事情から，分光放射束（W/nm）を直接求めることは少ないようである＊3)．

ここでは，この実情を考慮して計算を行ってみる．

ここで，LED の全光束をΦ_v (lm)，相対分光分布を $P_{rel}(\lambda)$，電流を I(A) とする．全光束と相対分光分布の関係は(4.1)式のようになる．

$$\Phi_v = K_m\cdot K_1\int_{360}^{830} P_{rel}(\lambda)V(\lambda)\,d\lambda \quad \cdots\cdots (4.1)$$

Km は最大視感効率 683(lm/W)，K_1は相対分光分布を分光放射束にする係数である．

＊3）分光放射束を直接値付してある標準がないこともその理由の1つである．

表1　青緑色 LED の相対分光分布の例
Table 1　Relative spectral distribution of some blue green LED.

λ (nm)	$P_{rel}(\lambda)$	λ (nm)	$P_{rel}(\lambda)$	λ (nm)	$P_{rel}(\lambda)$	λ (nm)	$P_{rel}(\lambda)$
445	0.0000	485	0.0809	525	0.7190	565	0.0494
450	0.0003	490	0.1498	530	0.5551	570	0.0340
455	0.0015	495	0.2721	535	0.4081	575	0.0237
460	0.0033	500	0.4620	540	0.3000	580	0.0157
465	0.0067	505	0.6995	545	0.2154	585	0.0104
470	0.0128	510	0.9118	550	0.1491	590	0.0069
475	0.0236	515	1.0000	555	0.1031	595	0.0041
480	0.0445	520	0.8871	560	0.0730	600	0.0020

$$K_l = \frac{\Phi_v}{K_m \int_{360}^{830} P_{rel}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.2)$$

これから分光放射束 P(λ)は(4.3)式のようになり，(4.4)式で量子効率η_eが求められる．

$$P(\lambda) = K_l \cdot P_{rel}(\lambda) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.3)$$

$$\eta_e = \frac{N_p}{N_e} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda \cdot P(\lambda) d\lambda \times 0.50357 \times 10^{16}}{I \times 6.2414 \times 10^{18}} \quad \cdots\cdots\cdots (4.4)$$

実例として，全光束が2.89(lm)，I＝0.02(A)，相対分光分布が**表1**のような LED の量子効率を求める．

$$K_l = \frac{\Phi_v}{K_m \int_{360}^{830} P_{rel}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} = \frac{2.89}{1.5826 \times 10^4} = 1.826 \times 10^{-4}$$

$$N_e = 0.02 \times 6.2414 \times 10^{18} = 1.2483 \times 10^{17}$$

$$N_p = 1.826 \times 10^{-4} \times 1.89 \times 10^4 \times 0.5036 \times 10^{16} = 1.7382 \times 10^{16}$$

$$\eta_e = N_p / N_e = 0.139$$

ただし，この結果にはパッケージによる発光の吸収が考慮されていないので，実際の量子効率の値はこの1.1～1.2倍となろう．

また，この計算の逆の過程によって，η_eと I および$P_{rel}(\lambda)$から全光束を求めることもできるので，試みられたい．

次回は引き続いて，蛍光体の量子効率測定法と実測例について解説する．