

ライトアナライザーLA-105に関する Q&A

1. [PFD\(光量子束密度\)の測定原理は何ですか？](#)
2. [PFDと照度はどのような関係がありますか？](#)
3. [SDカードに出力されたエクセルのデータは何を意味していますか？](#)
4. [JIS AA とは何ですか？](#)
5. [コサイン補正とは何ですか？](#)
6. [ライトアナライザーの校正方法をお教えてください。](#)
7. [ルクス、ルーメン、及びカンデラの関係をお教え下さい。](#)

Q1 PFD(光量子束密度)の測定原理は何ですか？

LA-105 を含め光の測定器が実測するのは、センサーが受け取った光のエネルギーです(例えば、太陽光パネルの発電量)。光を粒子として見た場合、測定器が受け取った光子(光の粒子)の数は、受け取ったエネルギーを光子 1 個のエネルギーで割ることによって求めることができます。即ち波長 λ (nm)の光の 1nm 当たり、1 秒間当たり、1 m²当たりの個数(分光光量子束密度:単位 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}/\text{nm}$)は下式により算出されます。

$$\begin{aligned} \text{分光光量子束密度 } (\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}/\text{nm}) &= [\text{受け取ったエネルギー}] \div [\text{光子 1 個のエネルギー}] \\ &= [\text{分光放射照度 } (\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}) \times 10^{-3}] \div [\text{プランク定数 } (\text{Js}) \times \text{光速 } (\text{m}/\text{s}) \div \\ &\quad \text{波長 } \lambda (\text{nm}) \times \text{アボガドロ数}] \times 10^6 \end{aligned}$$

この式の計算方法については以下に説明しますが、実際に LA-105 が出力した分光放射照度のデータを用いて PFD を計算した結果をエクセルファイル『[LA-105 で分光放射照度から放射照度、光量子束密度、照度を計算する方法](#)』に記載しております。B 列が分光照射照度(波長毎の放射照度で単位は $\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$)の実測値です。例えば、分光光量子束密度の欄の D3 のセルをクリックして上の fx をクリックすればどのセルを参照しているかが分かります。

●測定器が受け取った光子の個数は、測定器が実測したエネルギーを光子 1 個のエネルギーで割ることによって求めることができます。

光子 1 個のエネルギーはプランクの式 $E=h\nu$ [$h(c/\lambda)$]より求められます。この式は波長が決まれば自動的に光子 1 個のエネルギーが決まることを示しています。

h : プランク定数($6.62607015 \times 10^{-34}$ Js)

E : エネルギー(J)

ν : 振動数(無単位数)

c : 光速(299.792458×10^6 m/s)

λ : 波長(m)

なお、1 秒間当たりのエネルギー(J/s)はワット(W)で表されますので($W=J/s$)、1 m²当たり 1 秒間当たりのエネルギーは放射照度(W/m^2)になります。

実際は波長毎に分光放射照度 (mW/m²/nm)を測定するのですが、説明を簡単にするためにある特定波長の光について計算を進めます。

[単位面積(m²)当たり 1 秒間当たりの光子の個数(光量子束密度)(個数/m²/s)] = [1 秒間当たり 1 m²当たりの光のエネルギー(放射照度)(W/m²)] ÷ [光子 1 個のエネルギー(J)]

光子 1 個のエネルギーはあまりにも小さく、また光合成反応はモル単位で計算しますので、アボガドロ数 6.02214076 × 10²³を掛けてモルで表示します。

[光量子束密度(mol/m²/s)] = [放射照度(W/m²)] ÷ [光子 1 個のエネルギー × アボガドロ数 (6.02214076×10²³)]

モルでも数値(個数)がまだ小さすぎますので μmol で表します(μmol/m²/s)。

[光量子束密度(μmol/m²/s)] = [放射照度(W/m²)] ÷ [光子 1 個のエネルギー × アボガドロ数] × 10⁶

LA-105 が実際に測定しているのは分光放射照度(mW/m²/nm)ですので、

[1 m²当たり 1 秒間当たり 1nm 当たりの光子の個数(分光光量子束密度)(μmol/m²/s/nm)] = [分光放射照度(mW/m²/nm) × 10⁻³] ÷ [光子 1 個のエネルギー × アボガドロ数] × 10⁶になります。

光子 1 個のエネルギー = プランク定数 (Js) × 光速 (m/s) ÷ 波長 λ (m)ですので、

分光光量子束密度(μmol/m²/s/nm) = [分光放射照度(mW/m²/nm) × 10⁻³] ÷ [プランク定数 (Js) × 光速 (m/s) ÷ 波長 λ (m) × アボガドロ数] × 10⁶となります。

更にプランク定数、光速、アボガドロ数の数値を入力し、波長を nm で表すと、

分光光量子束密度(μmol/m²/s/nm) = [分光放射照度(mW/m²/nm) × 10⁻³] ÷ [6.62607015 × 10⁻³⁴(Js) × 299.792458 × 10⁶(m/s) ÷ 波長 λ(nm) × 10⁹ × 6.02214076 × 10²³] × 10⁶

[] 内の光子 1 個のエネルギーの乗数部分を整理すると

分光光量子束密度(μmol/m²/s/nm) = [分光放射照度(mW/m²/nm) × 10⁻³] ÷ [6.62607015 × 299.792458 ÷ 波長 λ(nm) × 6.02214076 × 10⁴] × 10⁶となります。

●測定した全波長の光量子束密度(PFD)を求めるには、下式に従って分光光量子束密度の関数 P(λ)を 380nm から 780nm まで λ で積分すれば良いことになります。

$$PFD = \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} P(\lambda)d\lambda$$

$$P(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{(h \cdot c / \lambda \cdot N_A)}$$

f(λ) : 分光放射照度 (波長の関数) [(mW/m²/nm)]

h : プランク定数(Js)

c : 光速(m/s)

λ : 波長(nm)

N_A : アボガドロ数 (無単位)

しかしながら分光光量子束密度の関数 $P(\lambda)$ が不明ですので、下式のように台形公式を用いて数値積分する必要があります。

$$\text{PFD } (\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}) = \sum_{i=380}^{i=780} ([P_i + P_{i+1}] / 2)$$

$$\text{PPFD } (\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}) = \sum_{i=400}^{i=700} ([P_i + P_{i+1}] / 2)$$

P_i : 波長 i の時の分光光量子束密度 (単位は $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}/\text{nm}$)

実際に計算した結果は、『[LA-105 で分光放射照度から放射照度、光量子束密度、照度を計算する方法](#)』の E 列 413 行に PFD、414 行 PPFD を示しています。

なお、光量子束 (photon flux) ($\mu\text{mol}/\text{s}$) は光源が 1 秒間あたりに放射する光子の全個数を表すもので、積分球を用いて 360° 全ての方向に放射された光子の個数を計測して求めます。

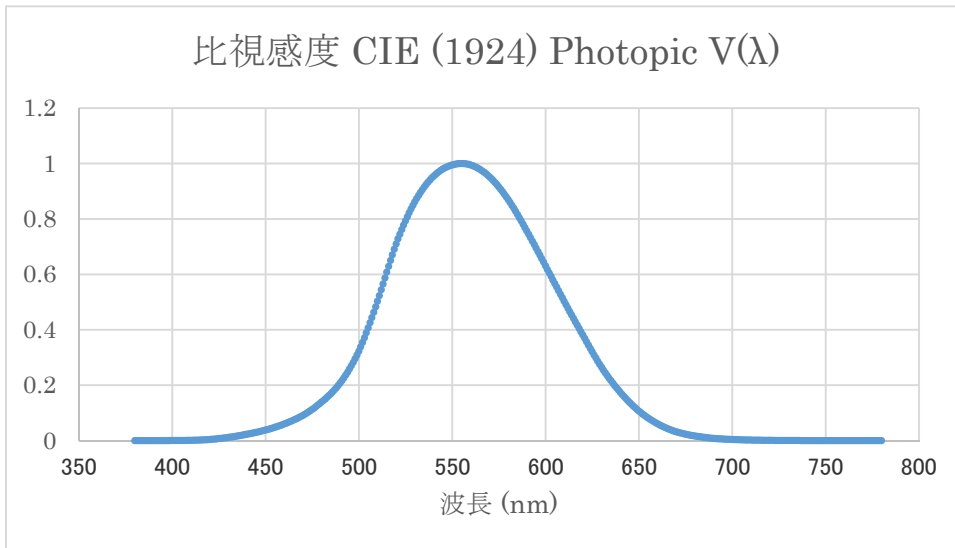
Q2 PFD と照度はどのような関係がありますか？

照度 (illuminance) は人間の眼で見た光の強さを表しており、PFD とは直接関係がありません。人間の眼に 380nm から 780nm の光を照射して網膜電位を測定することにより、各波長の比視感度 $S(\lambda_i)$ (下図) を求めることができますが、その結果が CIE により公表されています (<http://www.cvrl.org/cie.htm>)。これを実測した分光放射照度 ($\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$) に乗じ、更に係数 683/1000 を乗じ 380nm から 780nm まで波長で数値積分したものが照度です。

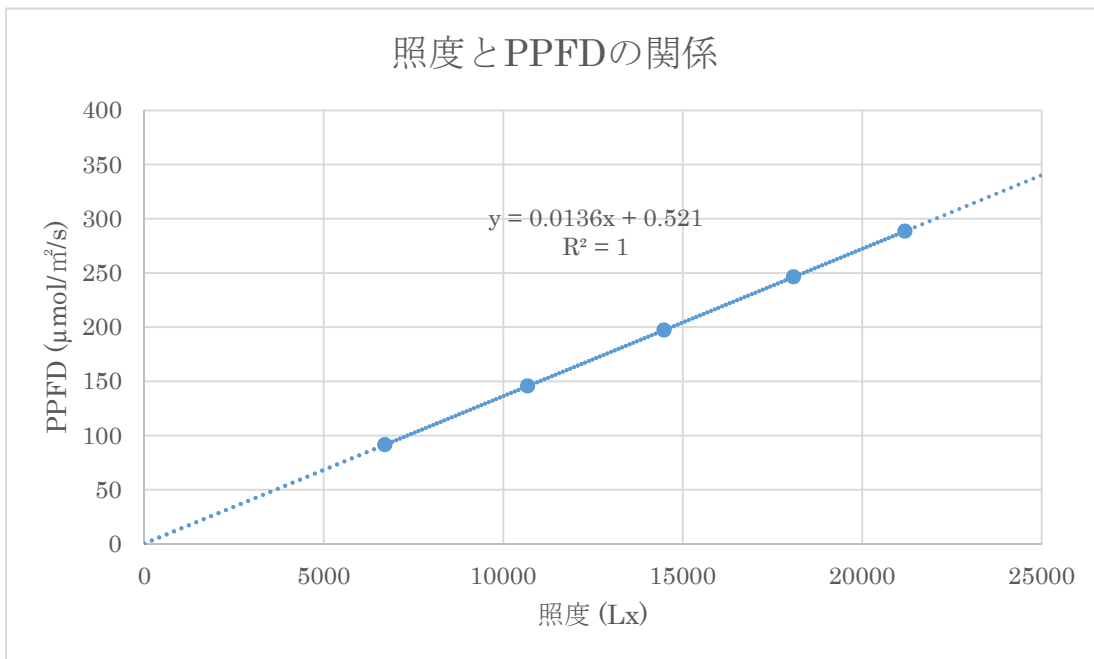
$$\text{照度 } (L_x) = \sum_{i=380}^{i=780} [V(\lambda_i) \cdot f(\lambda_i) + V(\lambda_{i+1}) \cdot f(\lambda_{i+1})] / 2 \times 683 / 1000$$

$V(\lambda_i)$: 波長 λ_i の時の比視感度 (無単位)

$f(\lambda_i)$: 波長 λ_i の時の分光放射照度 ($\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$)



但し、実際は照度 (lx) と光合成量子束密度 (PPFD) との間には実験的に良好な比例関係が認められております。下図は弊社の人工気象器 (LPH-411PFDT-S) を用いて照度と PPFD を同時に測定し、照度に対して PPFD をプロットしたものです。ほぼ原点を通る良好な直線が得られております。



Richard W. Thimijan と Royal D. Heins は 1983 年に種々の光源での照度から光量子束密度への変換係数を報告しています。"Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion" HORTSCIENCE, VOL. 18(6), page 818-820, DECEMBER 1983

http://www.plantgrower.org/uploads/6/5/5/4/65545169/light_conversion_paper_thimijan_1983_ocr.pdf

Q3 SD カードに出力されたエクセルのデータは何を意味していますか？

LUX: 照度(単位は lx)

fc: 照度(lm/m²)をメートルではなくフィートで表したものです(単位は lm/ft²)

CCT: 相関色温度(correlated color temperature)で、色を絶対温度で表します。

Duv~dv: 『[LA-105 の測定項目](#)』の説明を御参照下さい。

Etime: 露光時間(単位は ms)

x, y: CIE1931色座標の x 値とy値です。この 2 つの値で発光色が決まります。

u', v': 上記と同様に色を決めるパラメータですが、CIE1976色座標を使用したものです。

LambdaP: λ_p (ピーク波長)

LambdaPValue: λ_p 値(ピーク波長の分光放射照度、単位 mW/m²/nm)

LambdaD: ドミナント波長(λ_d : dominant wavelength)のことで、スペクトル下面積が最も大きなピークで放射照度が最大値を示す波長です。

Purity: 色純度(color purity)を表します。

IRR: 放射照度(irradiance)を表します(単位 W/m²)。

CRI(R1~R15): 演色性評価数。詳細は『[LA-105 の測定項目](#)』の説明を御参照下さい。

PPFD: photosynthetic photon flux density(光合成光量子束密度、単位 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

PFD: photon flux density(光量子束密度、単位 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

PFD-UV: 380~400nm の範囲で分光光量子束密度を波長で数値積分した値(台形法による)

PFD-B: 400~500nm の範囲で分光光量子束密度を波長で数値積分した値(台形法による)

PFD-G: 500~600nm の範囲で分光光量子束密度を波長で数値積分した値(台形法による)

PFD-R: 600~700nm の範囲で分光光量子束密度を波長で数値積分した値(台形法による)

PFD-FR: 700~780nm の範囲で分光光量子束密度を波長で数値積分した値(台形法による)

380nm~780nm: 各波長の分光放射照度(単位は mW/m²/nm)

詳細は、『[LA-105 の測定項目](#)』の説明を御参照下さい。

Q4 JIS AA とは何ですか？

日本工業規格の照度計第 1 部: 一般計量器(JIS 1609-1:2006)で定められた「一般形 AA 級照度計」の規格に適合する照度計であることを意味します。

照度は光の(垂直を 0°とした)入射角のコサインに比例します(ランベルトの余弦則)。しかしながら、照度計は入射角が水平面に近づくほど誤差(理論値との差)が大きくなりますので、この誤差に応じて JIS は「一般形精密級照度計」、「一般形 AA 級照度計」、及び「一般形 A 級照度計」の 3 種の規格を設けております。LA-105はこの「一般形 AA 級照度計」の規格に適合しております。

Q5 コサイン補正とは何ですか？

斜めからの光の入射については、LA-105 内部で理論値(ランベルトの余弦則)と一致するように補正を加えており、これがコサイン補正です。しかしながら、やはり垂直を 0°とした時の 80°(水平面から 10°)付近から誤差が大きくなります。

Q6 ライトアナライザーの校正方法をお教えてください。

「日本電気計器検定所(JEMIC)」にて照度の校正が可能です。100lx、1000lx、及び 3000lx の 3 点校正となります。納期は通常 10 日間です。費用等は弊社営業にお問い合わせ下さい。

また、上記の Q2 に記載したように、照度と PPFD との間には比例関係があることから、以下のよう
に照度の校正で求めた補正係数を PPFD の補正に流用することも可能です。

●照度の校正による PPFD の補正

照度の真値を L_t 、照度の観測値を L_o とし、照度の校正結果から得られた補正係数を C_L (既知) とすると以下の式が成り立ちます。

$$L_t = C_L \times L_o \dots (1)$$

PPFD の真値を P_t 、PPFD の観測値を P_o とし、 C_p を観測値 P_o から真値 P_t を求めるための補正係数とすると以下の式が成り立ちます。

$$P_t = C_p \times P_o \dots (2) \text{ (この } C_p \text{ を求めるのが目的)}$$

PPFD と照度は比例関係にあることからその比例定数を k とすると以下の式が成り立ちます。

$$P_o = k \times L_o \dots (3) \text{ (PPFD の観測値 } P_o \text{ は照度の観測値 } L_o \text{ と比例関係にあり比例定数は } k)$$

$$P_t = k \times L_t \dots (4) \text{ (PPFD の真値 } P_t \text{ は照度の真値 } L_t \text{ と比例関係にあり比例定数は } k)$$

PPFD の補正係数 C_p は(2)式より

$$C_p = P_t / P_o$$

この P_o と P_t に(3)式と(4)式を代入すると

$$C_p = (k \times L_t) / (k \times L_o)$$

$$= L_t / L_o \text{ (比例定数 } k \text{ が消えます)}$$

式(1)から $C_L = L_t / L_o$ なので、 $C_p = C_L$ となり、照度の校正で得られた補正係数と PPFD の補正に使用する補正係数は同じになります。

なおこの関係は上記の計算から光源の種類にかかわらず成立します(もちろん主として 400nm から 700nm の範囲に発光スペクトルを持つ光源に限ります)。

Q7 ルクス、ルーメン、及びカンデラの関係をお教え下さい。

照度(illuminance)は光が照射される場所での光の強さで、光束(Lm ルーメン)と光度(cn カンデラ)は光源の光の強さを表します。いずれも人間の眼で見た時の光の強さです。

1. 光束 Lm

照度 L_x は 1 m² 当たりの光束 Lm です。1 点の光源から照射された光は球面状に 360° の方向に広がります。光源からの距離 r (m) の球の表面積は $4\pi r^2$ ですので、照度 L_x は光束 Lm $\div (4\pi r^2)$ となります。ただし、通常、光源は天井や壁に取り付けますので、180° の半球に広がることになり、その場合の照度 L_x は光束 Lm $\div (2\pi r^2)$ となります。逆に光源からの距離が r の時の照度 L_x が測定されていれば、光源の光束 Lm は照度 $L_x \times 2\pi r^2$ となります。

$$L_x = L_m / (2\pi r^2)$$

$$L_m = L_x \times (2\pi r^2)$$

2. 光度(cn)

光度 cn はステラジアン(sr) 当たりの光束 Lm です。sr は立体角で、球のある表面の部分の

表面積を r^2 で割ったものです。球の表面積は $4\pi r^2$ ですので、半球 (180°) の sr は $2\pi r^2 \div r^2 = 2\pi$ となります。

$$cd=Lm/sr$$

$$cd=Lm/2\pi(\text{半球の光度})$$

Lx と cn の関係は以下ようになります。

$$Lm=Lx \times (2\pi r^2)$$

$$cd= Lx \times (2\pi r^2) / 2\pi$$

$$cd= Lx \times r^2$$

$$Lx=cd/r^2$$

即ち、照度 Lx は光源からの距離の 2 乗に反比例することになります。

参考サイト(明るさ計算 <https://tomari.org/main/java/hikari.html>)

by H. Tanaka