Ver. 250407
By H. Tanaka

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. 露光時間はどのように設定すれば良いですか？
4. 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？
5. 発光スペクトルの縦軸の単位に「/nm」が入る理由は何ですか？
6. 測定値がばらつく原因は何でしょうか？
7. 本体と光学部（センサー）との間に何本の Type C ケーブルを接続することができますか。
8. JIS AA とは何ですか？
9. ライトアナライザーの校正方法をお教えください。
10. 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（光の粒子のことで英語では photon フォトンと呼ばれている）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出来ます。即ち波長 λ（nm）の光の 1nm 当たり、1 秒間当たり、1 ㎡当たりの個数（分光光量子束密度：単位 μmol/m^2/s/nm）は下式により算出されます。

分光光量子束密度 (μmol/m^2/s/nm) = [受け取ったエネルギー] ÷ [光子 1 個のエネルギー]
= [分光放射照度 (mW/m^2/nm) × 10^{-3}] ÷ [プランク定数 (Js) × 光速 (m/s) ÷ 波長 λ (nm) × アボガドロ数] × 10^6

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 mW/㎡/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=hv [h(c/λ)]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(6.62607015×10^{-34} Js)
E： エネルギー(J)
v：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 ㎡当たり 1 秒間当たりのエネルギーは放射照度（W/㎡）になります。

実際は波長毎に分光放射照度 (mW/m^2/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（㎡）当たり 1 秒間当たりの光子の個数（光量子束密度）（個数/m^2/s）] ＝ [1 秒間当たり 1 ㎡当たりの光のエネルギー（放射照度）（W/㎡）] ÷ [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 $6.02214076 \times 10^{23}$ を掛けてモルで表示します。

[光量子束密度（mol/m^2/s）] ＝ [放射照度（W/㎡）] ÷ [光子 1 個のエネルギー × アボガドロ数（6.02214076×10^{23}）]

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/m^2/s）。

[光量子束密度（μmol/m^2/s）]＝ [放射照度（W/㎡）] ÷ [光子 1 個のエネルギー × アボガドロ数] × 10^6

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

[1 ㎡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/m^2/s/nm）]＝ [分光放射照度（mW/㎡/nm）× 10^{-3}] ÷ [光子 1 個のエネルギー × アボガドロ数] × 10^6 になります。

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

分光光量子束密度（μmol/m^2/s/nm） ＝ [分光放射照度（mW/㎡/nm）× 10^{-3}] ÷ [プランク定数 (Js) × 光速度 (m/s) ÷ 波長 λ (m) × アボガドロ数] × 10^6 となります。

更にプランク定数、光速度、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/m^2/s/nm） ＝ [分光放射照度（mW/㎡/nm）× 10^{-3}] ÷ [$6.62607015 \times 10^{-34}$（Js）× 299.792458×10^6（m/s）÷ 波長 λ（nm）× $10^9 \times 6.02214076 \times 10^{23}$] × 10^6

[ ] 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/m^2/s/nm）＝ [分光放射照度（mW/㎡/nm）×10^{-3}] ÷ [$6.62607015 \times 299.792458$ ÷ 波長 λ（nm） × 6.02214076×10^4] × 10^6 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/m^2/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(λ)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。

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

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

Pi：波長 i の時の分光光量子束密度（単位は μmol/m²/s/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）(μmol/s) は光源が 1 秒間当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。

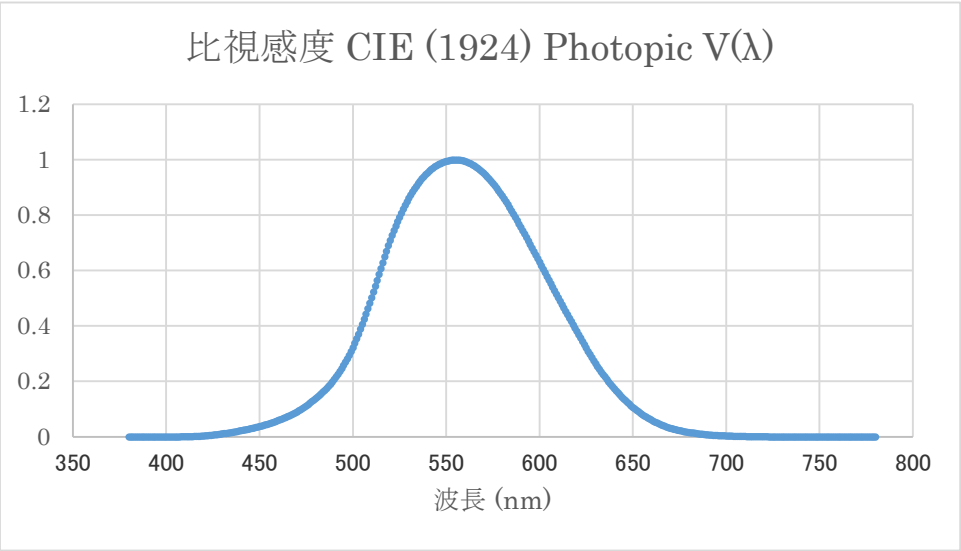
Q2 PFD と照度はどのような関係がありますか？

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(λi)（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(mW/㎡/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。

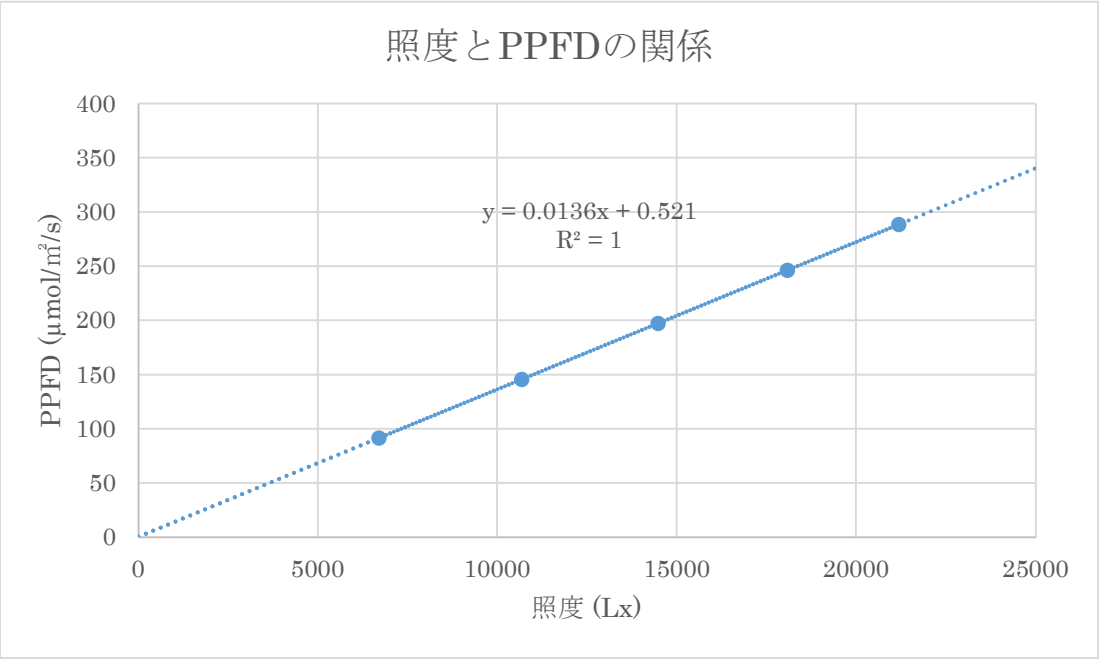
$$\text{照度（Lx）} = \sum_{i=380}^{i=780} [V(\lambda_i)\cdot f(\lambda_i)+V(\lambda_{i+1})\cdot f(\lambda_{i+1})]/2\times 683/1000$$

$V(\lambda_i)$：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（mW/㎡/nm）



但し、実際は照度（lx）と光合成光量子束密度（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

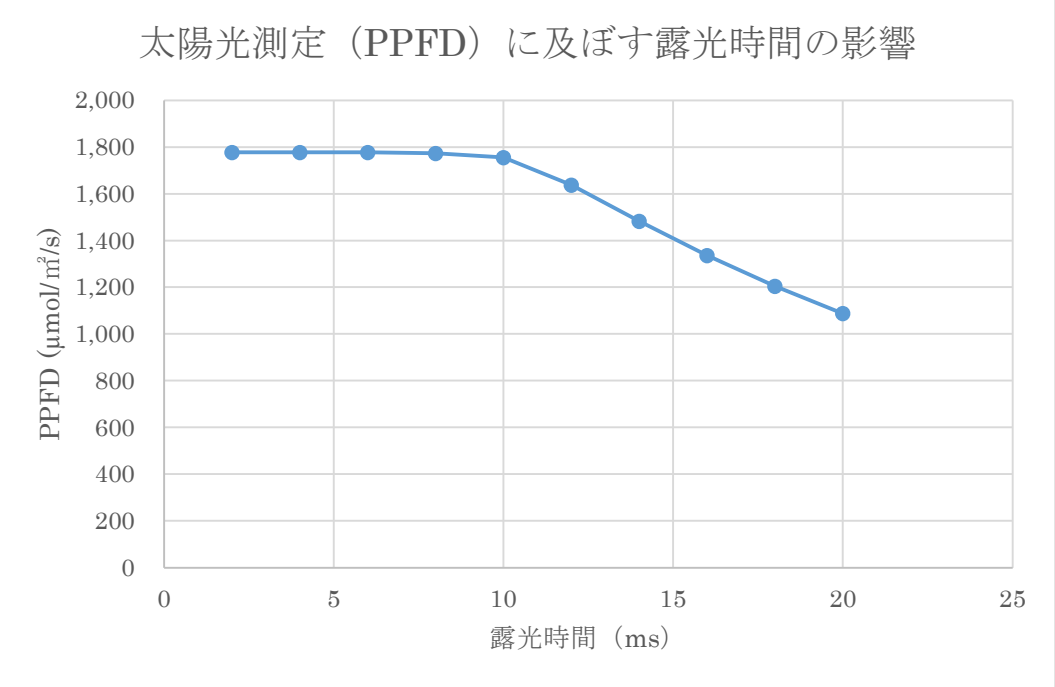
Q3 露光時間はどのように設定すれば良いですか？

特別な理由がない限り、**自動モードを選択**して下さい。

PPFD の単位は μmol/㎡/s ですので、露光時間に関わらず測定値は理論上一定です。

太陽光を手動モードで測定し、PPFD に及ぼす露光時間の影響を調べたのが下図です。

露光時間 8 ms（ミリ秒）までは理論通り 1 定値（約 1800μmol/㎡/s）を示しましたが、10 ms を超えると露出オーバーのため測定不能となりました。なお、自動モードで測定した時の露光時間は 7 ms でした。従って、通常の測定では手動モードではなく自動モードを選択する必要があります。



Q4 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/㎡）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：λp（ピーク波長）

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

LambdaD：ドミナント波長（λd：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/㎡）。

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 μmol/m²/s）

PFD：photon flux density（光量子束密度、単位 μmol/m²/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/㎡/nm）
詳細は、『LA-105 の測定項目』の説明を御参照下さい。

Q5 発光スペクトルの縦軸の単位に「/nm」が入る理由は何ですか？

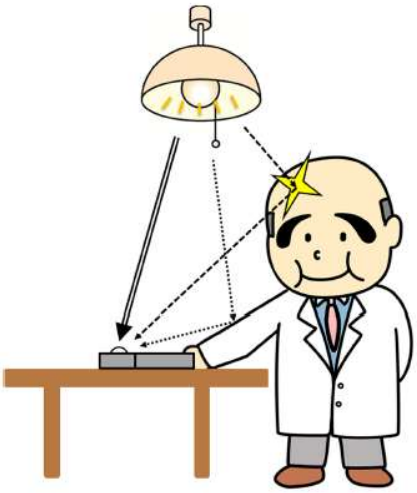
ライトアナライザーに限らず発光スペクトルの縦軸には分光放射照度の単位 mW/㎡/nm（1nm 当たり、1 ㎡当たりのエネルギー）が記載されるのが普通です。この質問は言い換えるとなぜ波長に対して放射照度（mW/㎡）をプロットできないかと云うことになります。
理由は、完全に単一波長の光は理論的に存在しないからです。実際の光には必ず波長の幅があるので、ある波長の幅でしか放射照度を測定できません。
従って、ある波長の幅で放射照度を割った mW/㎡/nm が縦軸の単位になります。
分光放射照度を E_λ、放射照度を E、波長を λ と表記すると、数学的には分光照射照度は、$E_\lambda = dE/d\lambda$ と放射照度を波長で微分したものになります。
従って、放射照度 E は、下式のように分光放射照度 E_λ を波長 λ で積分することによって得られます。

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda$$

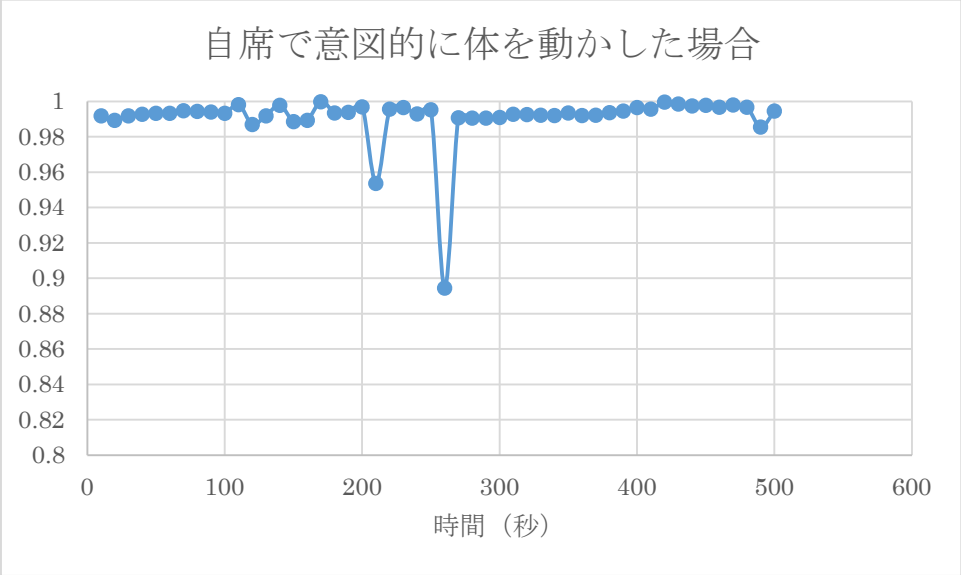
（出典：https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%94%BE%E5%B0%84%E7%85%A7%E5%BA%A6）
実際は、Q1 の回答に記載したとおり、台形公式を用いた数値積分を行っています。

Q6 測定値がばらつく原因は何でしょうか？

ライトアナライザーの単純な繰り返し測定精度は極めて高く、変動係数（標準偏差／平均値）は約 0.03%です。測定がばらつく要因は以下の通りです。
1. 外的要因
（1）測定者自身
測定者の反射光が測定に影響を及ぼします。



（出典：シーシーエス株式会社　照度計を使用する時の注意点　https://www.ccs-inc.co.jp/guide/column/light_color_part2/vol06.html）



上記のグラフは日本医化器械製作所本社の事務所内で天井の LED ランプの照度を測定したものです。

210 秒目と 260 秒目で、自席で（立ち上がる等）意図的に体を動かしました。

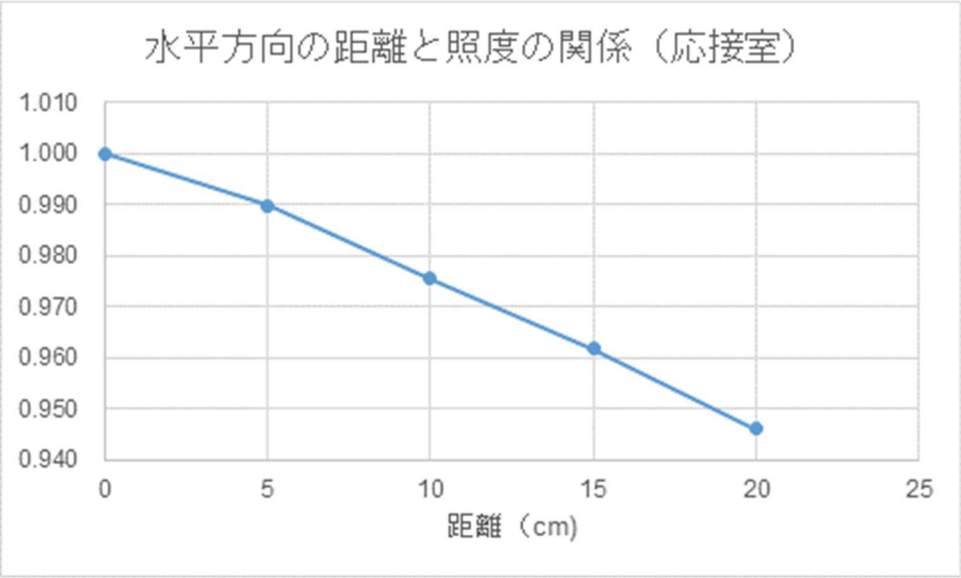
このように、自分自身の動きにより測定値は 10%程度変動しました。

従って、正確な測定値を得るためには延長ケーブル（Type C）を用いて遠隔で測定する必要があります。

（2）光源に対する受光部の位置

測定位置による照度の違いを調べるために、天井の直管型 LED ランプと 90 度の方向で受光部の位置を最大 20cm まで変えて照度を測定しました。

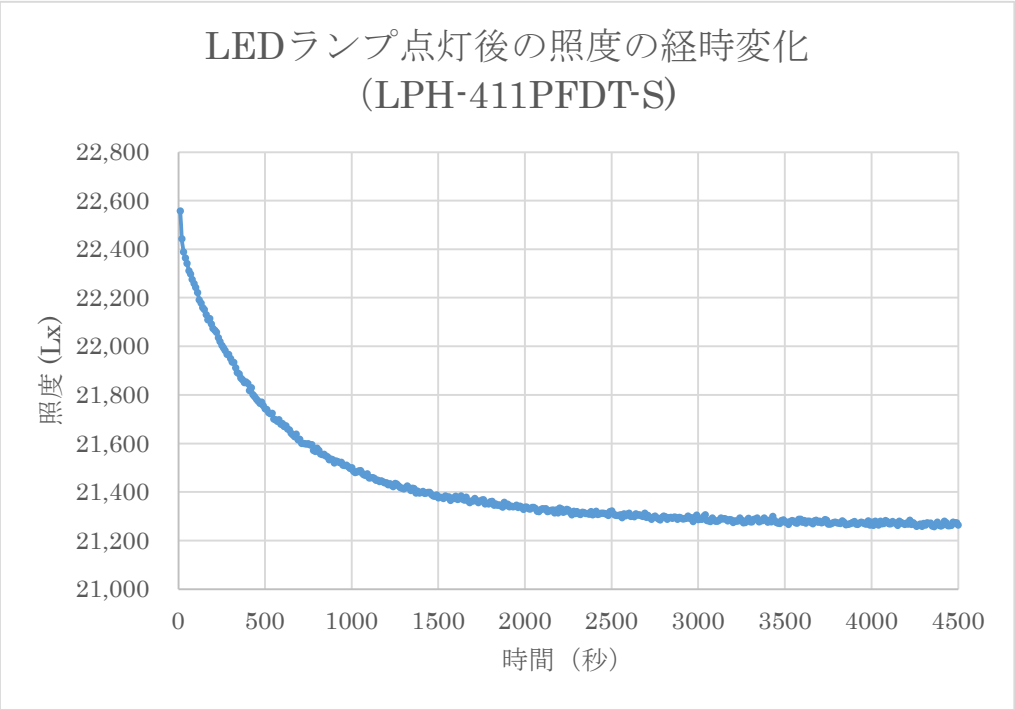
下図のように受光器の位置を 20cm ずらすと測定値が約 5%変化しました。



(3)光源(LED ランプ)の安定化時間

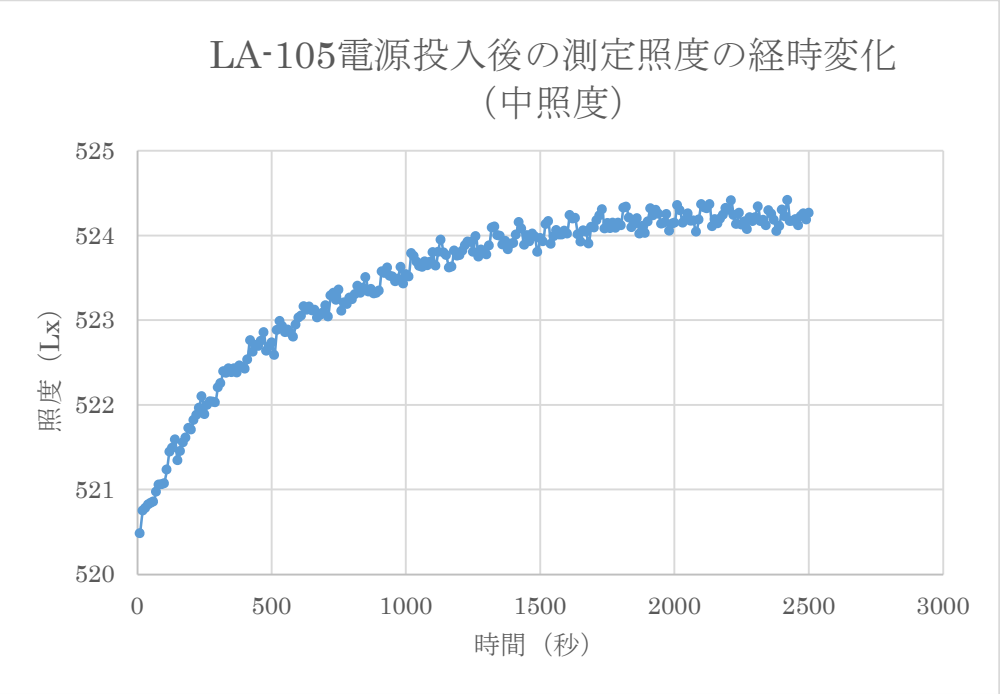
LED の特性として、温度が上昇すると出力が低下することから、LED の温度が一定になるまで照度が低下するようです。

（出典：https://edn.itmedia.co.jp/edn/articles/2009/17/news049.html）



上図は、弊社の人工気象器 LPH-411PFDT-S(電球色 LED 内蔵)内に受光部を置き、Type C ケーブルを用いて外部から照度を測定したものです。点灯後約 1 時間で一定値となりましたが、点灯直後と比べて約 6%照度が低下しました。従って、LED ランプの照度を正確に測定する場合は 1 時間以上のウォーミンアップ時間が必要と考えられます

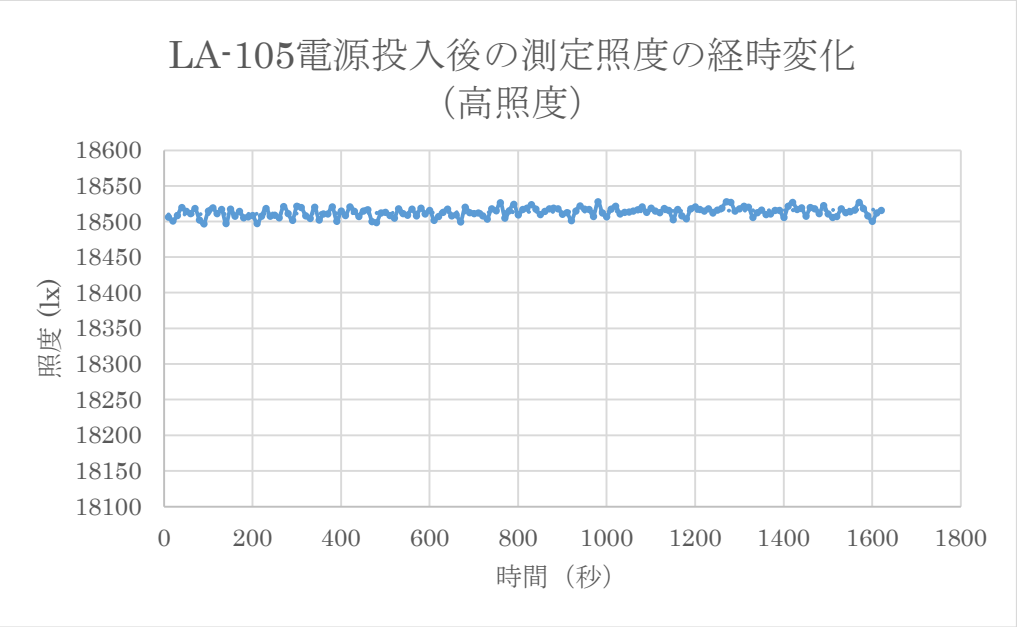
2. 内的要因（ライトアナライザー自身に起因する変動）



500Lx 程度の照度を測定した場合、ライトアナライザーの電源投入直後から安定するまでに約0.8%の差が生じました。

1%程度の誤差が許容されるのであれば、電源投入直後から使用しても構いませんが、厳密な測定を行う場合は、40 分以上のウオーミングアップ時間が必要です。なお、ライトアナライザーは無操作の状態が一定時間経過すると自動的に電源オフとなりますので、Logging 機能ご使用下さい（例えば、10 秒間隔で 1000 回）。

なお、高照度（18000lx）の場合は下図のように電源投入直後から 25 分後まで照度は殆ど変化しませんでしたので、電源投入直後から測定しても問題ありません。



Q7 本体と光学部（センサー）との間に何本の type C ケーブルを接続することができますか。

弊社で試験した結果では、3m の Type C ケーブルを 11 本（33m）接続しても問題ありませんでした。

	距離（m）	LUX	IRR	PPFD	PFD
ケーブル 1 本	3	501.0494	1.55082	6.94213	7.19560
ケーブル 2 本	6	500.8840	1.54980	6.93875	7.19070
ケーブル 3 本	9	500.8292	1.54944	6.93769	7.18887
ケーブル 4 本	12	501.1119	1.55122	6.94342	7.19756
ケーブル 5 本	15	500.8083	1.54922	6.93707	7.18783
ケーブル 6 本	18	500.7553	1.54879	6.93575	7.18565
ケーブル 7 本	21	500.7427	1.54872	6.93549	7.18532
ケーブル 8 本	24	501.0444	1.55069	6.94192	7.19485
ケーブル 9 本	27	500.6574	1.54830	6.93401	7.18329
ケーブル 10 本	30	500.6311	1.54804	6.93334	7.18196
ケーブル 11 本	33	500.6534	1.54822	6.93381	7.18285
再度 1 本のケーブル	3	500.5524	1.54780	6.93224	7.18085

Q8 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。

Q9 ライトアナライザーの校正方法をお教えください。

「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。

$L_t = C_L \times L_o$ … (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。

$P_t = C_p \times P_o$ …(2)（この C_p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。

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

$P_t = k \times L_t$ … (4)（PPFD の真値 P_t は照度の真値 L_t とも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

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

$= L_t/L_o$（比例定数 k 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）。

Q10 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 Lx は 1 ㎡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 Lx は光束 Lm ÷（$4\pi r^2$）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 Lx は光束 Lm ÷（$2\pi r^2$）となります。逆に光源からの距離が r の時の照度 Lx が測定されていれば、光源の光束 Lm は照度 Lx × $2\pi r^2$ となります。

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

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

   注）通常は Lx から Lm を正確に求めることはできません。

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。

   $cd=Lm/sr$

   $cd=Lm/2\pi$（半球の光度）

   従って、Lx と cn の関係は以下のようになります。

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

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

   $cd= Lx \times r^2$

   $Lx=cd/r^2$

   以上、理論的には照度 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）