

## 照度に基づく光量子計の間接校正方法

田中均  
株式会社日本医化器械製作所

### Indirect Calibration Method for Quantum Meters Using Illuminance Data

Hitoshi Tanaka  
Nippon Medical & Chemical Instruments Co., Ltd.

#### ABSTRACT

Although illuminance can be calibrated by accredited laboratories such as the Japan Quality Assurance Organization, there are currently no institutions in Japan capable of providing traceable calibration for photosynthetic photon flux density (*PPFD*). We showed a theoretical proportionality between illuminance and *PPFD* for a given light source. Based on this relationship, we demonstrated that a correction factor derived from illuminance calibration can also be applied to *PPFD* in quantum meters capable of measuring both parameters.

**KEYWORDS:** quantum meter, photon flux density, calibration, illuminance, *PPFD*

#### 和文要旨

照度のトレーサブルな校正は認定事業者によって実施可能であるが、光合成光量子束密度 (*PPFD*) については現時点では日本国内に認定業者が存在しない。本報告では、同一光源において照度と *PPFD* の間に比例関係があることを示し、この比例関係を利用することにより、照度と *PPFD* を同時に測定できる光量子計では、照度の校正から導出された補正係数が、そのまま *PPFD* に適用できることを明らかにした。

キーワード：光量子計、光量子束密度、校正、照度、*PPFD*

## 1. はじめに

植物研究分野における光量の指標としては、照度 (illuminance) ではなく、光合成光子束密度 (*PPFD*: photosynthetic photon flux density) が用いられるのが一般的である<sup>1)</sup>。これは光合成に必要な光が人間の目に感じる明るさ (照度) ではなく、光子数に基づくためである。*PPFD* を正確に測定するには光量子計の校正が重要となる。現在、照度のトレーサブルな校正は幾つかの認定事業者によって実施可能であるが、*PPFD* については同様の校正を行っている認定業者は日本には存在しない。そこで本報告では、照度と *PPFD* の両方を測定できる光量子計において、照度の校正結果を *PPFD* の校正に応用できるかを検討したので報告する。

## 2. 照度と *PPFD* との関係

同一光源において、照度と *PPFD* が比例関係にあることは古くから知られている。Richard W. Thimijan および Royal D. Heins は 1983 年に、さまざまな光源における *PPFD* ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) から照度 (lx) への変換係数を報告している<sup>2)</sup>。この照度と *PPFD* との比例関係は、以下に示すように原理的に成立する。

光源の放射エネルギー (単位: W) が変化しても、波長  $\lambda$  の関数である分光放射照度  $f(\lambda)$  (単位:  $\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$ ) のスペクトルの形は変化しないので、光源の放射エネルギーを  $\alpha$  倍とした時に  $f(\lambda)$  は全波長に渡って  $\alpha f(\lambda)$  となる ( $\alpha$  は波長に依存しない定数)。

元の照度である  $E_0$ 、および光源の放射エネルギーを  $\alpha$  倍した時の照度である  $E_\alpha$  は以下の式で表される。

$$E_0 = \int_{380}^{780} f(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$f(\lambda)$ : 波長  $\lambda$  の関数である分光放射照度 ( $\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$ )

$V(\lambda)$ : 波長  $\lambda$  の関数である比視感度 (無次元)<sup>3)</sup>

$K_m$ : W をルーメンに変換する係数 ( $K_m = 683 \text{ lm}/\text{W}$ )

$$E_\alpha = \int_{380}^{780} \alpha f(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$= \alpha \int_{380}^{780} K_m f(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

$$= \alpha E_0 \quad (4)$$

同様に、元の *PPFD* である  $P_0$ 、および光源の放射エネルギーを  $\alpha$  倍した時の *PPFD* である  $P_\alpha$  は以下の式で表される。

$$P_0 = \int_{400}^{700} f(\lambda)/p(\lambda)d\lambda \quad (5)$$

$p(\lambda) = hc/\lambda N_A$  (波長  $\lambda$  における光子 1 モルのエネルギー)

$h$  : プランク定数(Js)  
 $c$  : 光速(m/s)  
 $\lambda$  : 波長(nm)  
 $N_A$  : アボガドロ数 (無次元)

$$P_\alpha = \int_{400}^{700} \alpha f(\lambda)/p(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$$= \alpha \int_{400}^{700} f(\lambda)/p(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$= \alpha P_0 \quad (8)$$

従って、光源の放射エネルギーが  $\alpha$  倍になった時に照度 ( $E$ ) と  $PPFD$  ( $P$ ) も同様に  $\alpha$  倍になる。すなわち、両者の間に比例関係 ( $P=kE$ ) が成り立つことが分かる。なお、この関係は  $PPFD$  だけでなく、任意の波長帯域の光量子束密度 (PFD: photon flux density) にも成立する (但し、380nm~400nm 及び 700nm~780nm を除く)。

実験的にも照度と PFD との間には良好な比例関係が認められる。図 1 は人工気象器 (LPH-411PFDT-S、日本医化器械製作所) 内の LED ランプの照度と PFD を光量子計 (ライトアナライザ LA-105、日本医化器械製作所) を用いて同時に測定し、照度に対して  $PPFD$  (400nm~700nm)、PFD-All (380nm~780nm)、PFD-B (400nm~500nm)、PFD-G (500nm~600nm)、PFD-R (600nm~700nm)、及び PFD-FR (700nm~780nm) をプロットしたものである。なお、図 1 の各点は LED ランプを PWM (パルス幅変調) 方式により 100% から 80%、60%、40%、20% に調光した時の照度と PFD を表す。照度と各波長帯の PFD はすべて原点を通る直線となり、良好な比例関係が確認された。 $PPFD$  (実線) の直線の傾き 0.0136 が照度から  $PPFD$  への変換係数である。

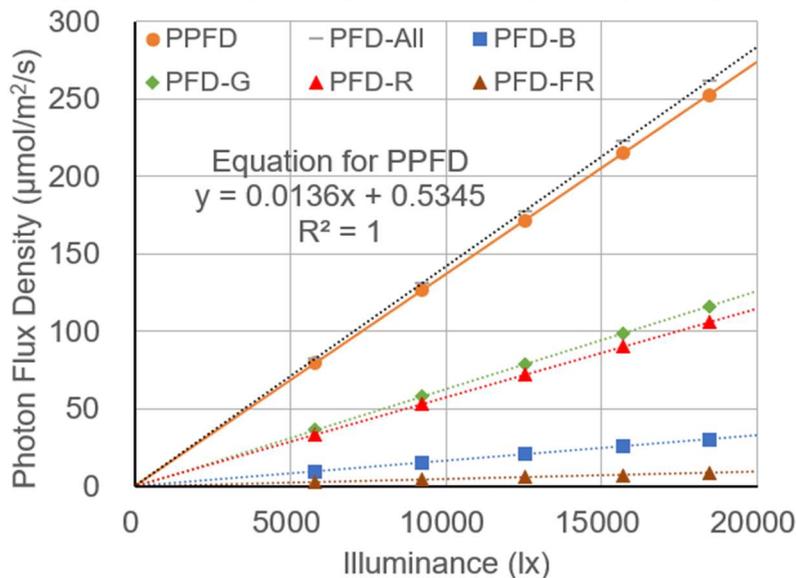


Fig. 1 Relationship between Illuminance and Photon Flux Density

図1 照度と光量子束密度との関係

なお、照度と *PPFD* の両方を測定できる光量子計の場合は、まず測定範囲の全波長に渡って分光放射照度を実測し、このデータに基づいて照度と *PPFD* を計算で求めることから、照度から *PPFD* への変換係数を1回の測定で正確に得ることが可能である。一方、照度と *PPFD* を別々の測定器で測定して照度から *PPFD* への変換係数を求める場合には、測定誤差を考慮して多数回の測定が必要である。

### 3. 照度の校正から得た補正係数による *PPFD* の補正

上記のように照度と *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得た補正係数を *PPFD* にも適用できるかを検討した。

照度の真値を  $E_t$ 、観測値を  $E_o$  とし、照度の校正結果から得られた補正係数を  $C_E$  (既知) とすると以下の式が成り立つ。

$$E_t = C_E E_o \quad (9)$$

*PPFD* の真値を  $P_t$ 、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つ。

$$P_t = C_P P_o \quad (10)$$

*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つ。

$$P_o = k E_o \quad (11)$$

$$P_t = k E_t \quad (12)$$

*PPFD* の補正係数  $C_P$  は式(10)より

$$C_P = P_t / P_o \quad (13)$$

式(11)および(12)を用いて

$$C_P = (k E_t) / (k E_o) \\ = E_t / E_o$$

式(9)より  $C_E = E_t / E_o$  である。従って  $C_E = C_P$  となり、照度の校正で得られた補正係数  $C_E$  と *PPFD* の補正に使用する補正係数  $C_P$  は一致することになる。なお、この関係は光源の種類にかかわらず成立する。

### 4. 実測例

表1に、財団法人日本品質保証機構 (JQA) <sup>4)</sup> による光量子計 (ライトアナライザー LA-106) の照度の校正結果を示す。

表1 表示値及び校正値

Table 1 Display Values and Calibrated True Values

Displayed Value (lx) by the Quantum Meter	Calibrated True Value (lx) by the JQA
1000	1012
3000	3025
6000	6101
10000	10093

光量子計の照度の表示値に対して校正值（真値）をプロットしたのが図2であり、原点を通る傾き 1.0102 の直線が得られている。この 1.0102 が照度の補正係数であり、PPFD の補正係数としても使用可能である。

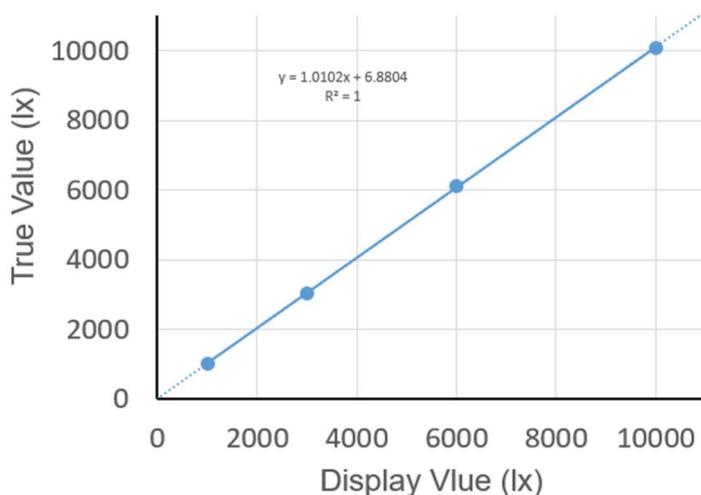


Fig. 2 Calibration Curve of the Quantum Meter for Illuminance

図2 光量子計における照度の校正曲線

PPFD の校正については、例えば、当該光量子計の PPFD の表示値が  $7.213 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  であった場合、真の PPFD は上記の補正係数 1.0102 を用いて  $7.213 \times 1.0102 = 7.29 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  となる（有効数字 3 桁）。

## 5. むすび

本報告では、同一光源において照度と PPFD が理論的に比例関係にあることを示し、照度と PPFD を同時に測定できる光量子計では、照度の校正によって得られた補正係数がそのまま PPFD の補正係数として使用可能であることを明らかにした。この校正方法は照度と PPFD の両方を測定できる光量子計にしか適用できないが、光源のスペクトルが変化しない限り、1 回の測定で照度から PPFD への変換係数を正確に算出することが可能である。仮に照度計しか保有していない場合であっても、このような光量子計を借用して使用光源の照度から PPFD に変換する係数を求めておけば、照度から簡単に PPFD を算出することが可能である。

## 参考文献

- 1) Jun, L. and Van Iersel, M.W.: Photosynthetic Physiology of Blue, Green, and Red Light: Light Intensity Effects and Underlying Mechanisms, *Front.Plant Sci.* **12**, 619987 (2021)  
(doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.619987>)
- 2) Thimijan R.W. and Heins R.D.: Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion, *HortScience*, **18**, 818-822 (1983).  
(doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818>)
- 3) CIE spectral luminous efficiency for photopic vision, Data set [CIE sle photopic.csv](#)  
(doi: <https://doi.org/10.25039/CIE.DS.dktna2s3>)
- 4) Japan Quality Assurance Organization (JQA)  
[https://www.jqa.jp/service\\_list/measure/service/emc/luxmeter.html](https://www.jqa.jp/service_list/measure/service/emc/luxmeter.html)  
申込書 [https://www.jqa.jp/service\\_list/measure/action/application/](https://www.jqa.jp/service_list/measure/action/application/)