

LED 植物栽培空間の光環境測定ガイドライン

特定非営利活動法人植物工場研究会
一般社団法人日本植物工場産業協会

1. はじめに

本ガイドラインは、栽培棚を有する栽培空間において、複数の LED 照明器具で構成する照明システムを取り付ける栽培棚の光環境の特性の表示方法に関するものである。LED 照明器具自体の特性表示については「植物用 LED 照明器具特性表のガイドライン」に従うこと。

2. 栽培棚の光環境測定

栽培棚の栽植面における光の強さは光合成有効光量子束密度（Photosynthetic photon flux density: PPFD, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）を用いること。測定に用いる PPFD 計はメーカー毎に光合成有効波長域の感度が違い、測定値が異なることがある点に留意すること。

ここでは、光源が栽植の上側に配置されている、一般的な下方照射の栽培棚の例を述べる。

測定は、無栽植時と栽植時の 2 ケースについて行うこと。

2. 1 無栽植時を想定した測定

無栽植を仮定した光測定を行う。

測定時は、白色シートを栽植面に貼り、PPFD 計で PPFD を測定する。

2. 2 栽植時を想定した測定

緑色葉の群落を仮定して栽植時の光測定を行う。

測定時は、緑色葉の反射率を模擬したシートまたは黒色シート（たとえば植毛紙）を栽植面に貼り、PPFD 計で PPFD を測定する。

2. 3 PPFD 分布

栽植面における PPFD の均一度を示すために、無栽植時の PPFD の測定値±標準偏差（S.D.）。（例： $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）を示すこと。また、光源と栽植面の距離、栽植面の材質を記すこと。

【測定例】

PPFD は、 1 m^2 当たり 20 ブロックに分けて各ブロックの中央点で測定する。20 ポイントの測定値と標準偏差（S.D.）を求めて、測定値±S.D.と表す。なお、必要に応じてポイント数を増やしてよい。

【参考】

植物個体間の成長のばらつきを抑えるためには、栽植面の PPFD のばらつきを小さくすることが重要である。たとえば、葉菜類を栽培する場合は、変動係数（ $\text{CV} = \text{S.D.}/\text{平均値}$ ）が 10%以下であることが望ましい。

3. 照明システムの照明率

LED ランプから放出される光合成有効光量子束（PPF）に対して栽培面積にその面の平均 PPFD を乗じた値の比を照明システムの照明率（Y）と定義する。

光合成有効光量子束 (Photon flux density: PPF, mol s⁻¹)、対象とする栽培面の面積 A (m²) の平均光合成有効光量子束密度を PPFD (mol m⁻² s⁻¹)、面積 A 当たりの照明器具の本数を N とすれば、照明率 Y は下記で求められる。

$$Y = \text{PPFD} \times A / \text{PPF} \times N$$

この照明率と栽培面の PPFD 分布とあわせて表示するのが望ましい。

PPF の測定法については「植物用 LED 照明器具特性表のガイドライン」を参照すること。

4. 測定上の注意

- 1) 光源および測定器の始動後、動作が安定してから測定すること。
- 2) 測定者の手や身体の反射に注意すること。

参考資料

1. 書籍

CIE S 025/E:2015「LED ランプ, モジュールおよび照明器具の試験方法」解説、日本照明委員会 (JCIE)、JCIE-003、2016 発行

2. 用語

コンパクト版 照明ハンドブック、照明学会編、オーム社、573 ページ、2006 発行

補足

1. 白色シート

白色シートの光合成有効波長域の平均反射率は 95%以上が望ましい。

2. 緑色葉の反射率

緑色葉の光合成有効波長域の平均反射率は一般に 5~10%である。

3. 植毛紙

通常の黒い紙と比べて表面の反射を抑える効果を持っている黒く短い毛が埋め込まれた紙。

4. 反射資材の利用

照射光の利用効率を高めるために、また PPFD の均一性を高めるために、光源面、側面等に反射板を利用することができる。反射資材は光合成有効波長域の平均反射率が 99%以上のものもある。選択にあたっては、正反射型 (入射角と反射角が等しく、反射光線が平行光線になるタイプ) と拡散型 (入射光が様々な方向に反射されるタイプ) があるので、特性を把握して使うのがよい。

5. 測定条件の記載

光測定の結果を示す際には、各種シート (白色シート、黒色シート、緑色葉、植毛紙) の反射率を明記すること。

栽培棚に反射板を取り付ける場合は、その資材の反射特性および取り付け位置を明示すること。

6. PPF 計の取り扱い

PPFD 計のセンサーは受光部の汚れや劣化で出力が変化するため、取り扱いに注意すること。また、定期的に校正すること。

測定例

1. 測定条件の例

光源：別表に記載（植物用 LED 照明器具特性表のガイドラインに準拠すること）

光源の配置：別図の通り

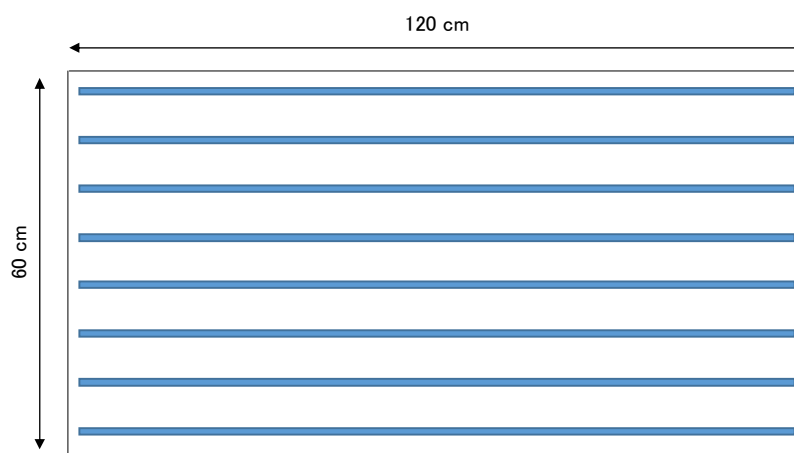
灯具のピッチ：7.5 cm

光源と栽培面の距離：30 cm

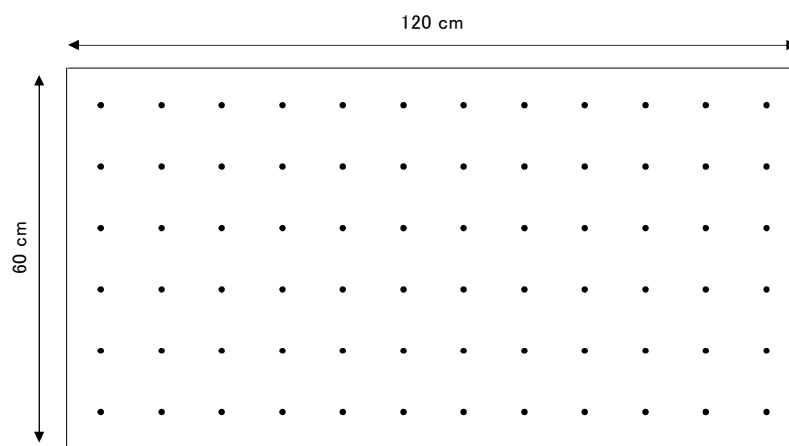
白色シート：光合成有効波長域の平均反射率 95 %

緑色葉を模擬したシート：光合成有効波長域の平均反射率 15 %

測定点の配置：別図の通り（10 cm 格子状）



栽培棚上の光源の配置（上面図）



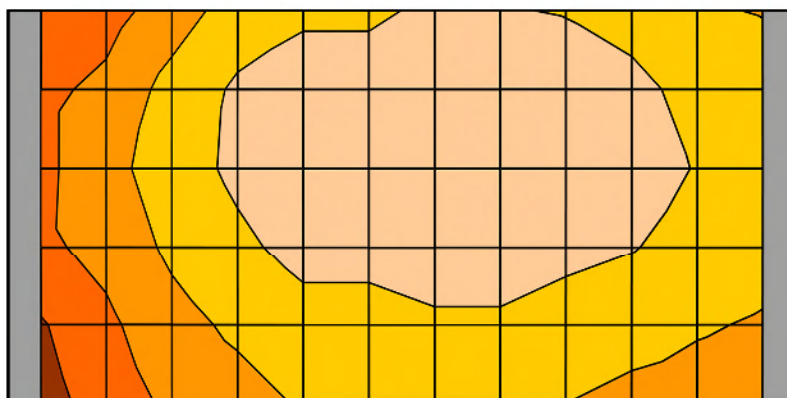
栽培面の測定点の配置（平面図）

2. PPFD 数値図と等 PPFD 分布図

60 cm x 120 cm の栽培面において測定した PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) を数値図と等 PPFD 分布図に示す。

(1) 無栽植時を想定した PPFD

152	169	184	192	202	202	201	205	200	195	192	189
158	176	193	204	213	213	217	217	212	207	202	198
176	186	204	216	226	226	230	230	225	221	213	208
175	193	211	224	233	233	237	237	232	228	219	214
175	185	207	223	231	231	234	233	229	225	214	209
160	172	190	209	216	216	224	221	219	213	202	199
平均	204										
標準偏差	18										
変動係数(%)	9										
最小値	152										
最大値	237										



■140-160 ■160-180 ■180-200 ■200-220 ■220-240

(2) 栽植時を想定した PPFD 紙面の都合上ここでは省略

(3) 照明システムの照明率 0.72

応用

1. 多方向照射時の光環境の評価

側面照射や群落内に光源がある上方照射などの多方向照射における光環境の測定法は定まっていない。また、多方向照射が植物生育に及ぼす影響は不明な点が多いため、測定値の評価法はあまり議論されていない。ここでは複数の測定方法を紹介する。

1. 1 センサーを回転して測定

グローブチャンバーに LED 照明と水耕栽培装置を設置し、センサーをアングルバイスで 0°～90°に回転させて PPFD の測定を行った。

(1) 測定条件

光源：立山科学 1511-K27 (昼白色 LED)

灯具の配置：図のとおり (天面 4 灯、側面 4 灯)

光源と植栽面の距離：200 mm

白色パネル：M 式水耕パネル(590×890×30 mm、穴にウレタンキューブを挿入)

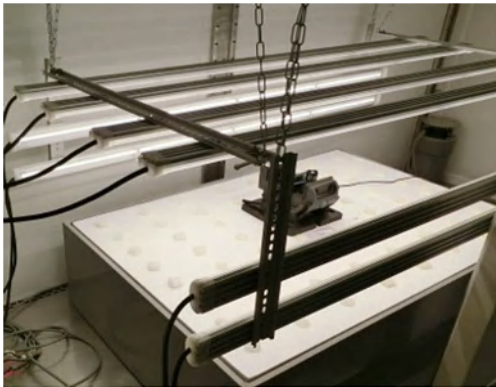
黒色シート：植毛紙 (平和紙業 NWスエード 短毛ブラック)

PPFD センサー：LI-COR LI-190SA

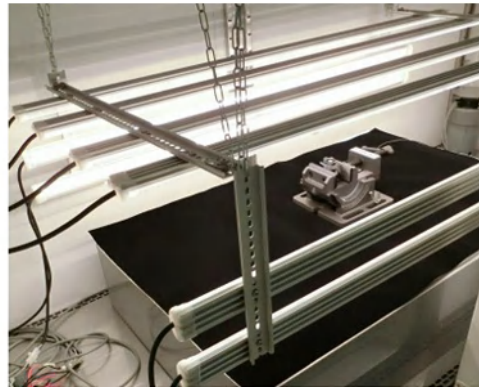
アングルバイス：エスコ EA525DF-1

PPFD：200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (白色パネル、0 度)

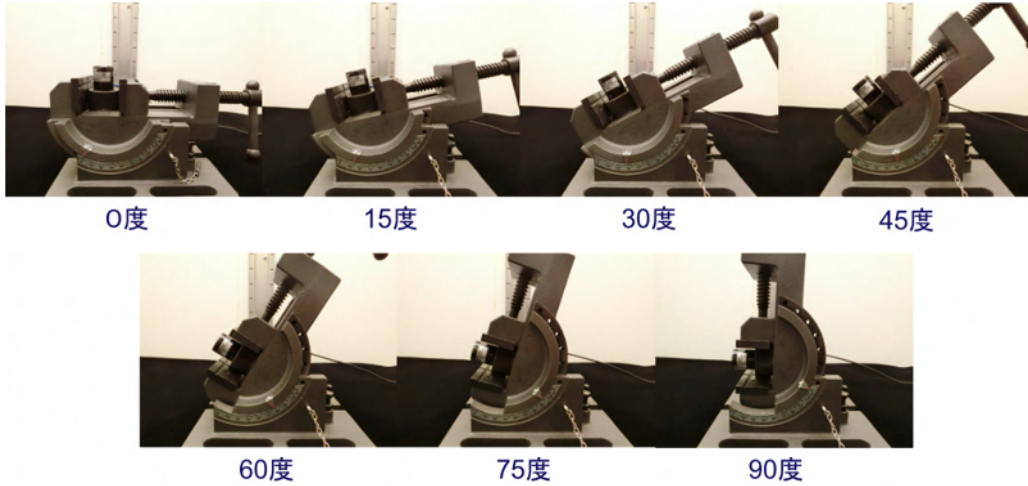
測定点：下図のとおり (水耕パネル中央で回転して測定)



白色パネルでの測定



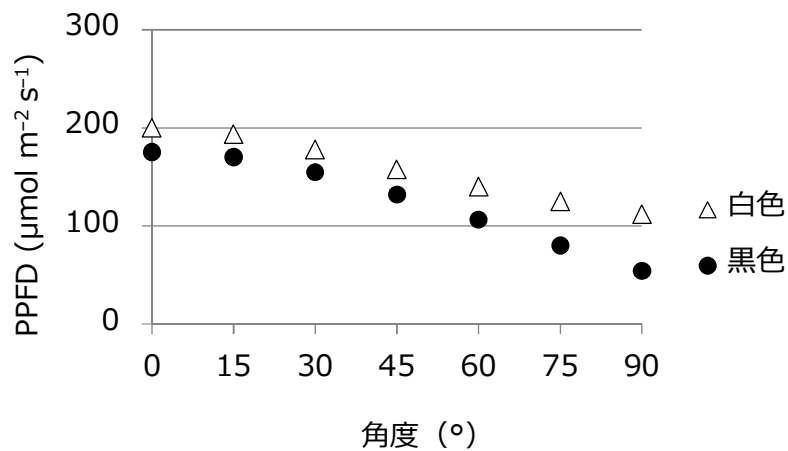
黒色シートでの測定



PPFD センサーの角度変化

(2) 測定結果

水耕パネル面が白色もしくは黒色の場合を設定して PPFD センサーを回転させて測定したところ、PPFD の値はいずれの角度でも白色のほうが高かった。また、センサーの角度が大となるに従い PPFD 値が低くなること、黒色のほうが角度増加による PPFD の減衰が大きいことが示された。



PPFD センサーをアングルバイスで回転させた場合の測定結果

1. 2 仮想 5 面を測定

グロースチャンバーに LED 照明と水耕栽培装置を設置し、5 軸センサーを使用して水耕パネル上面の 9 箇所における仮想 5 面の PPFD を測定した。

(1) 測定条件

光源：立山科学 1511-K27 (昼白色 LED)

灯具の配置：図のとおり（天面 4 灯、側面 4 灯）

光源と植栽面の距離：200 mm

白色パネル：M 式水耕パネル(590×890×30 mm、穴にウレタンキューブを挿入)

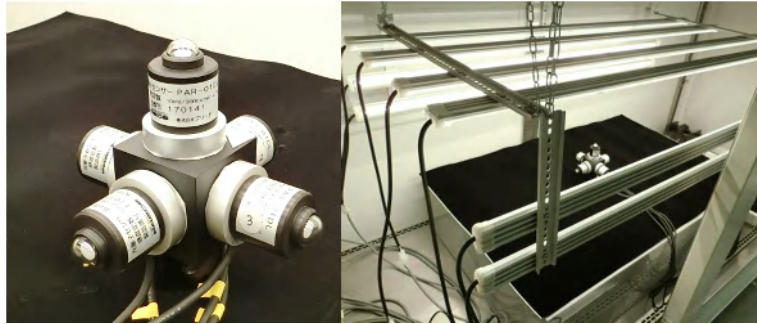
黒色シート：植毛紙（平和紙業 NWスエード 短毛ブラック）

PPFD センサー：ブリード PAR-01DL

データロガー：HIOKI LR8515 ワイヤレスロガー

PPFD：150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （黒色シート、中央）

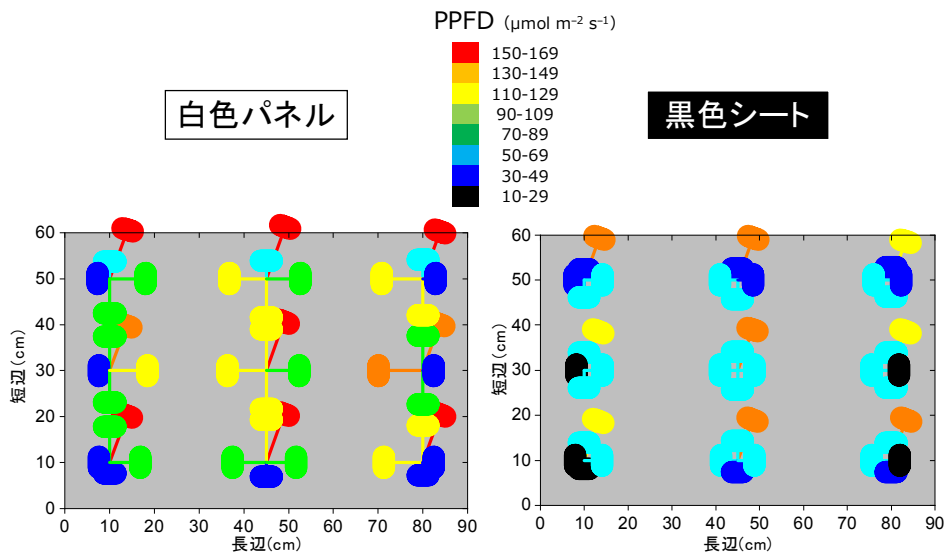
測定点：水耕パネル上面の 9 箇所



5 軸センサーと黒色シートにおける測定

（2）測定結果

水耕パネル面が白色もしくは黒色の場合を設定して 5 軸センサーで PPFD を測定したところ、全ての測定箇所において PPFD の 5 軸合計値は白色のほうが高かった。水耕パネル面の中央部では、白色と黒色の PPFD の差が大きく、反射光による PPFD の増加が 5 軸全てにおいて大きかった。一方、水耕パネルの縁側を向いた軸では白色と黒色の PPFD の差が小さく、反射光による影響が少ないことが示された。



水耕パネル上面における 5 軸センサーを使用した場合の測定結果

2. 照明シミュレーションによる光環境の評価

照明器具の配光データ（たとえば IES フォーマットデータ）を用いれば、シミュレーションソフトを用いて栽植面の光強度分布を推定することができる。

比較的簡易にシミュレーションを行うためには、照度シミュレーションソフトウェアを用いる手法が考えられる。大手メーカーが提供しているソフトウェア、オープンソースのソフトウェアなど、さまざまな種類の照度シミュレーションソフトウェアが利用可能である。これを用いて、照度シミュレーションを実施し、結果として得られる照度を PPF_D に変換することができる。

より高い計算精度を得るためには、レイトレーシング（光線追跡法）の光学シミュレーションソフトウェアを用いる手法が考えられる。前述の照度シミュレーションソフトウェアに比べ、光学的知識が必要になるに加えて、入力情報も増加し、操作難易度が高くなるが、計算結果の精度が高く、照度を PPF_D に変換する手続きも不必要である。

関連シミュレーションソフトウェアに関する詳細は、参考資料を参照のこと。

照明学会誌 2014 年 Vol.98 / 第 98 巻 第 3 号 2014 年 3 月

特集資料

“照明シミュレーションプログラムのアルゴリズム”

“CG 系レンダリングプログラムの最先端”

“照明シミュレーションプログラムの計算精度について”

“照明シミュレーションプログラムの運用状況”

“照明シミュレーションプログラムの特徴”

LED 植物照明調査研究委員会

後藤 英司*	千葉大学
富士原 和宏**	東京大学
竹内 良一**	昭和電工株式会社
秋山 卓二	株式会社プランテックス
岡崎 聖一	株式会社キーストーンテクノロジー
金満 伸央	前スタンレー電気株式会社
賀 冬仙	中国農業大学
木本 徳胤	京セラ株式会社
古在 豊樹	NPO 植物工場研究会
桜井 弘	ウシオライティング株式会社
庄子 和博	(一財) 電力中央研究所
辻 昭久	日本アドバンスアグリ株式会社
中西 岳	株式会社日本医化器械製作所
中村 謙治	エスバックミック株式会社
林 絵理	NPO 植物工場研究会
丸尾 達	千葉大学
魯 娜 (Lu Na)	千葉大学
渡邊 博之	玉川大学

*委員長、**副委員長

2019年1月18日 初版