

# 自然エネルギー利用低炭素型施設園芸栽培技術の開発

## —施設園芸用 LED 照明技術の開発— (第 3 報)

生産技術部

福島章吾 大坪昭文 白仁田和彦

田中徹 中野太郎

本研究では、佐賀県における施設園芸のための LED 照明の設計と制御技術について検討し、施設園芸栽培の現場への導入を目指した LED 照明システムの設計試作を行う。本年度は LED 照明システムの実用性を評価するため、LED 照明器を遠隔地からパソコンやマイコンで制御する方法や太陽光発電システムによる電源供給の方法、また長期間連続稼働した時の安定性やキクの電照栽培への適用について検証する。まず、太陽光発電システムを電源としてパソコンから ZigBee 規格の無線通信により複数の LED 照明器の発光時間を制御するシステムを設計試作した。次に、試作した LED 照明システムを用いて、56 日間のキクの電照栽培実証試験を行った。その結果、試作したシステムは電照試験開始から終了まで正常に安定して LED の発光制御を行うことができた。また、試作したシステムを用いた電照栽培において、十分な花芽抑制効果が得られた。

### 1. はじめに

佐賀県内の施設園芸では、出荷時期や品質を調節するために電照栽培が行われており、照明器具として白熱電球がよく使用されている。しかし、白熱電球は消費電力が大きいことから、蛍光灯や LED 照明など省エネ効果の高い照明器具への置き換えが検討されている。また、LED 照明は特定の波長（色）の光を照射できることから<sup>1)</sup>、光の中から植物の成長に影響する波長を見出し、特定の光を利用する効率的な栽培技術の確立に対する期待も大きい。しかしながら、佐賀県においては、LED 照明を用いた施設園芸栽培の導入例はほとんどなく、その栽培ノウハウも十分には蓄積されていない。

そこで本研究では、佐賀県の施設園芸作物に対し、LED 照明の波長や発光パターンなど作物の生育に影響する諸条件を検討するため、LED 照明の設計と制御技術について研究し、施設園芸栽培の現場への導入を目指したシステムの設計試作を行う。

前年度までに、パソコン（以下 PC）やマイコンから LED 照明器の発光パターン（光量や発光時間）を制御するシステムの設計試作を行った<sup>2), 3)</sup>。本年度は、キクの電照栽培試験に必要な機能に絞り込み、太陽光発電システムを電源として PC から無線通信により複数の LED 照明器の発光を制御するシステムの設計試作を行った。また、佐賀県農業試験研究センター（以下農試）の施設において試作した LED 照明システムを用いて、キクの電照栽培実証試験を

行い、LED 照明器を遠隔地から PC やマイコンで制御する方法や太陽光発電システムによる電源供給の方法、また長期間連続稼働した時の安定性やキクの電照栽培への効果について検証した。

### 2. LED 照明システムの試作

#### 2.1 システムの構成

試作した無線通信による LED 照明器の発光制御システムを図 1 に示す。システムは、PC（親機）、LED 照明器（子機）及び太陽光発電システム（電源）で構成する。LED 照明器の電源 DC24V は、太陽光発電システムから供給する。

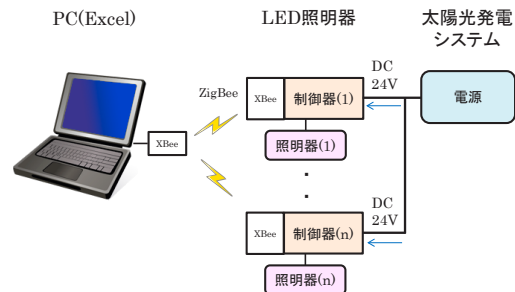


図 1 無線通信による LED 照明器の発光制御システムの構成

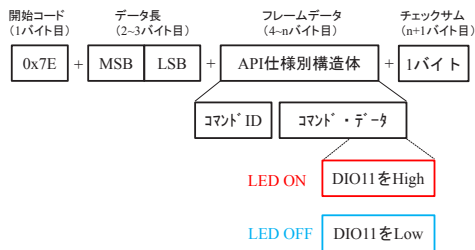


図2 伝送データの構造

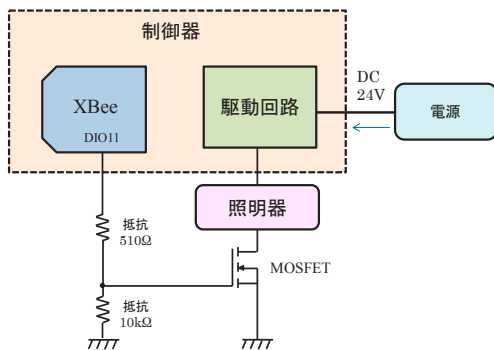


図3 LED照明器の詳細図

## 2.2 PCとLED照明器間のデータ伝送

PCとLED照明器間のデータの伝送は、ZigBee規格の無線通信モジュールXBeeを介して行う。PC側に送信用のXBee (Coordinator APIモードに設定)を1つ置き、各LED照明器に受信用のXBee (End Device APIモードに設定)をそれぞれ置く。

PCからLED照明器へデータを伝送する構造を図2に示す。このデータの構造は、APIフレームと呼ばれ、開始コード (0x7E) のあとに、データ長、フレームデータをつけ、最後尾にチェックサムをつける構造である。

LED照明器の詳細図を図3に示す。LED照明器のON及びOFFの制御は、それぞれのXBeeのDIO11端子に「High」信号あるいは「Low」信号を出力することで制御できる。

## 2.3 LED照明器の発光制御

### (1)発光パターンの設定

LED照明器の発光パターンは、24時間周期のタイムテーブルをExcelで作成する (図4)。テーブルでは、PCと通信で接続するLED照明器について、通信接続の状態を「有」と設定し、次いで発光させる時間帯の部分を「ON」とすることで、発光パターンを設定できる。

LEDタイムテーブル (24時間周期)

接続状態	時刻(hour)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
番号	有無	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	有	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
2	有	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
3	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
4	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
5	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
6	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
7	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
8	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
9	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
10	無	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

図4 発光パターンの設定画面

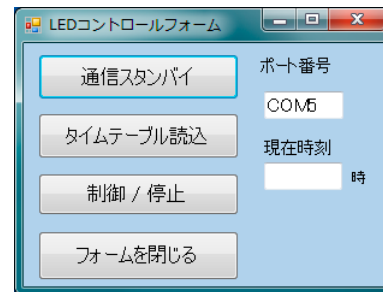


図5 VBフォーム画面

## (2)発光制御

LED照明器の発光制御は、PC上のVB (Visual Basic) フォーム画面から行う (図5)。フォーム画面上で、「通信スタンバイ」ボタンを押して、「タイムテーブル読み込み」ボタンを押すと、LED照明器の発光パターンを設定したタイムテーブルが読み込まれる。「制御/停止」ボタンを押すと制御が始まり、読み込んだタイムテーブルに従って、PCから無線通信により毎時0分0秒のタイミングでLED照明器の発光が制御される。

## 2.4 LED照明器の試作

### (1)光量の設定

キクの電照栽培に適用するためのLED照明の光量を設定するにあたり、LEDの波長は、キクの電照効果が高い波長630nmとした<sup>4)</sup>。光量については、実用されている白熱電球と比較すると、同じ照度でも光源の波長分布 (分光分布) が異なることから、キクに対する花芽抑制の影響度が変化する。そこで、白熱電球とLED照明のキクに対する花芽抑制の影響度を等しくするために、波長毎に係数を掛け合わせて重みづけを行い、キクの電照栽培に必要な白熱電球の照度50lux<sup>4)</sup>に相当する光量を、LED照明を用いた場合に必要光量に換算している。換算表を用いると、LED照明 (630nm) を使用する場合は、光量子束密度0.57μmol/m<sup>2</sup>/sが基準となり、この時の照度は19luxとなる<sup>4)</sup>。

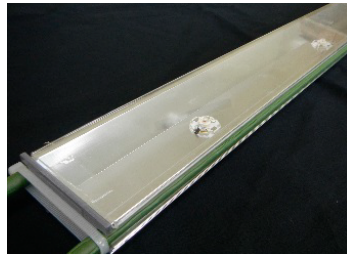
(2)LED 照明器の仕様

市販の LED 照明用アルミ製ヒートシンク (LED Ecology WebShop, 大きさ : 60×23.5×800mm) を二つ連結し, 長さ 160cm の細長い形状の照明器を試作した (図 6).

図 7 に示す LED 照明器の駆動回路は, 一定の光量を確保するため定電流素子 (LM317T) を用いた定電流回路とし, 可変抵抗 (0~10Ω) を変化させることで電流値を 100~600mA の範囲に設定できる. 電源は DC24V を入力するため, 定電流素子と抵抗で合計 4.25V 電圧降下することを踏まえると, LED に 19.75V の電圧を充てることができる. LED の順電圧は 2.4V (600mA 駆動の場合) であり, 最大 8 個まで接続可能となる. 駆動回路の特性上, 消費電力は LED の数量に依存しないため, 実証試験において基準となる光子束密度  $0.57 \mu \text{mol/m}^2/\text{s}$  が確実に得られるように, 最大数である 8 個の LED を使用した (図 6). LED 照明器の消費電力は, 14.4W (600mA 駆動の場合) となる.



(a)全体外観



(b)LED 取り付け部の拡大図

図 6 試作した LED 照明器

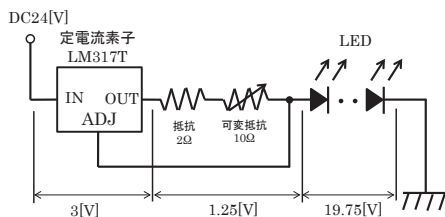


図 7 LED 照明器の駆動回路

2.5 太陽光発電システム

LED 照明器の DC24V 電源として用いた太陽光発電システムを図 8 に示す. システムは, 太陽光パネル (Xunlight, XR12-100), 鉛蓄電池 (AC デルコ, M31MF) 及び充放電コントローラ (福島電機, SPC-003) <sup>5)</sup> で構成する.

システムの動作は, まず, 太陽光パネルで発電した電力を充放電コントローラで過充電保護しながら鉛蓄電池に充電する. このとき, 太陽光パネル電圧 40~52V から鉛蓄電池電圧 24V へ降下させる際に, コントローラの MPPT 制御機能の働きによって, 電流量を調整することで電力ロスを極力減らしている. 次に, 鉛蓄電池に充電した電力は, 充放電コントローラで過放電保護しながら LED 照明器へ供給する.

太陽光パネルの出力  $P_{solar}(W)$  と鉛蓄電池の容量  $P_N(Ah)$  は, それぞれ式(1)及び式(2)から見積もる <sup>6)</sup>.

$$P_{solar} = P_{set}TK/24 \quad \dots (1)$$

$$P_N = P_{set}T10/24 \quad \dots (2)$$

$P_{set}$  は消費電力,  $T$  は使用時間,  $K$  は設置地域毎の係数である.  $K$  の値は佐賀から一番近い福岡の 17 とする.

同時に接続する LED 照明器の数量  $n$  を 4 台と想定し, 600mA 駆動で 4 時間使用する条件として計算すると,  $P_{solar}$  は 163W ( $=14.4W \times 4 \text{ 台} \times 4h \times 17/24$ ) 以上,  $P_N$  は 96Ah ( $=14.4W \times 4 \text{ 台} \times 4h \times 10 \text{ 日} / 24V$ ) 以上必要となる. ここでは,  $P_{solar}$  を 200W の出力,  $P_N$  を 100Ah の容量とした. 200W の太陽光パネルを用いた場合, 式(1)から逆算すると, 理論的には 1 日当たり 282Wh/day の電力量を供給できる.

3. 実証試験

3.1 試験内容

試作した LED 照明システムを夜間に利用し, キクの花芽を抑制する栽培試験を行い, 試作したシステ

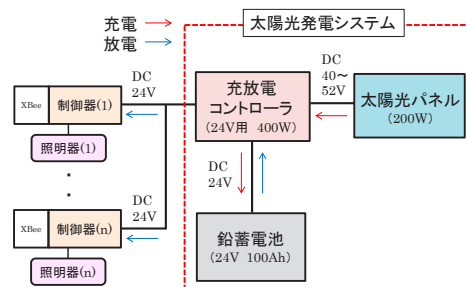


図 8 太陽光発電システム

ムの機能性、安定性、有効性について検証を行った(図9)。試験条件を表1に示す。

LED照明器の光量(光子束密度)は、2台を地上1.7mに設置した上で図10にその概略を示した照射区画において、キクの電照栽培試験に必要な $0.57 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ をほぼ満たすように調整を行った<sup>4)</sup>。照射区画における光量は、 $0.49\sim 1.38 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の範囲となった。この時の1台当たりのLED照明器の消費電力は、9.6W(400mA駆動の場合)となる。

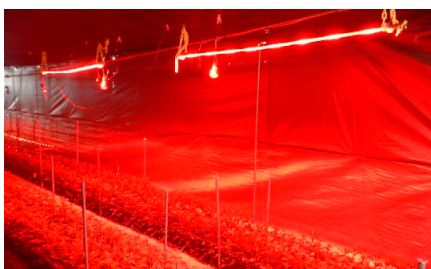


図9 実証試験風景

表1 試験内容

試験対象	キク	
電照試験開始(定植)	12月19日	
電照試験終了	2月12日	
栽培試験終了	4月上旬予定	
照射時間	22:00~2:00(4時間)	
光源	提案光源	LED照明器(630nm)
	対照光源	テーブル型LED(丸輪トレーディング, MWT-75PLANT) 電球型蛍光灯(東芝ライテック, EFD21EL-AGR1)

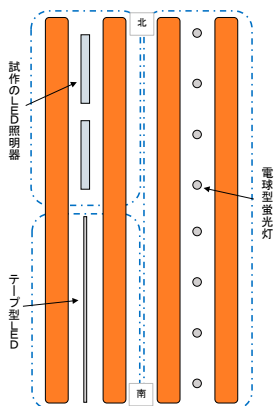


図10 ハウス内見取り図

### 3.2 試験結果及び考察

#### (1) システムの機能性

太陽光パネルで発電した電力を電源とし、夜間(午後10時から午前2時)にLED照明器の発光制御が行われているか確認を行った。確認方法は、PCと充放電コントローラ間を接続し、専用のソフトウェアを用いてシステムに関わる値(月日、時間、電力など)を時系列で記録した。

1日当たりの消費電力量(電照)[Wh/day]、1日当たりの充電量 [Wh/day]、鉛蓄電池電圧[V]の時系列データを図11に示す。1日当たりの消費電力量(電照)は、LED照明器の消費電力がほとんど変化しないことから、発光させた4時間を掛け合わせて見積もった。1日当たりの充電量は、システムを開始してから記録されている積算充電量を元に算出した。鉛蓄電池残量の測定が困難なので、鉛蓄電池電圧をその指標とした。毎日同一条件で比較するため、充電や消費が行われない午前5時の電圧値を用いた。以下にシステムの機能性に関する検証結果を示す。

- ・ 1日当たりの消費電力量(電照)が毎日およそ80Wh/dayを示していることから、正常にLED照明器による発光制御が行われたことを確認できる。
- ・ 1日当たりの充電量は、ほぼ1日当たりの消費電力量(電照)を上回っており、充電量は十分だと考えられる。
- ・ 鉛蓄電池電圧は、ほぼ25V近辺(80%)で安定しており、問題なく電力を供給できている。

なお、1/16~2/5の期間に1日当たりの充電量および鉛蓄電池電圧が大きく増減しているのは、太陽光パネルの発電能力(最大600Wh/day程度)を確認するため、意図的に別の負荷を加えた理由による。

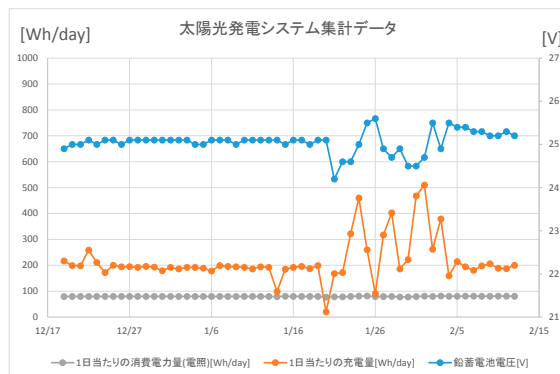


図11 太陽光発電システム集計データ

## (2) システムの安定性

試作した LED 照明システムは、電照試験開始（平成 26 年 12 月 19 日）から電照試験終了（平成 27 年 2 月 12 日）までの 56 日間、止まることなく正常に動作したことから、実際の電照栽培における連続使用に耐え得ると考えられる。

## (3) システムの有効性（LED 照明器のキクの電照栽培への適用）

キクの電照栽培では、現在白熱電球や蛍光灯が用いられている。LED 照明器がこれらの照明の代替光源になり得るかを検証するため、電球型蛍光灯との比較を行った。

LED 照明器と電球型蛍光灯で栽培した区画において、5 サンプルずつ茎の長さや葉の枚数をおよそ 20 日毎に記録し、平均値を表 2 にまとめた。その結果、茎の長さには両者で多少の違いはあるが、葉数はほぼ同様であり、成長の様相に違いはないと考えられる。また、電照試験終了（2 月 12 日）から 47 日後の 3 月 31 日時点のつぼみの状態を図 12 に示す。電球型蛍光灯と比較して大きな違いがないため、花芽が抑制できていないと考えられる。したがって、試作した LED 照明システムは、従来からの白熱電球、蛍光灯によるシステムの花芽抑制効果と相違なく、十分な抑制効果を有していると考えられる。

表 2 キクの成長比較

日付	経過日数	長さ[cm]		葉数	
		LED 照明器	電球型 蛍光灯	LED 照明器	電球型 蛍光灯
1/8	20	14.2	13.4	11.9	11.7
1/29	41	37.6	36.9	20.8	20.8
2/18	61	67.5	64.6	30.4	30.0
3/11	82	97.6	90.1	41.6	41.2
3/31	102	114	111	45.4	47.8

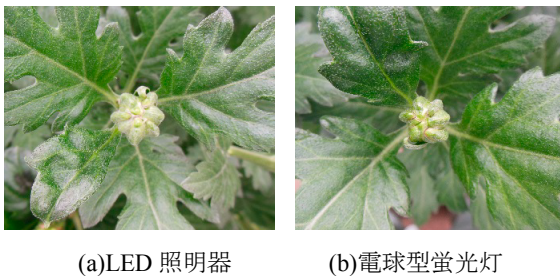


図 12 キクのつぼみ比較

## 4. システムの改良

実証試験に使用した LED 照明システムは、PC から無線により LED 照明器を制御していたが、持ち運びや現場での設定変更など、より簡便で使い勝手の良いシステムとするため、PC(親機)の役割をマイコン版コントローラ（以下コントローラ）に置き換えた。コントローラは、以下の仕様を満たすよう設計を行った。

- ・現在時刻や発光パターンの設定・保存をコントローラ上で行えること
- ・LED 照明器の発光パターンを制御できること
- ・コントローラと LED 照明器が無線通信できること

図 13 に試作したコントローラを示す。電源 DC5V を供給し、スイッチを入れると、メモリに保存されている現在の設定内容（時刻と発光パターン）が読み込まれ、制御を開始し、現在の設定内容が LCD（液晶表示器）に表示される。ここで、SET ボタンを短く押すと発光パターン（点灯開始時刻と通信接続する LED 照明器）を変更する画面が表示され、SET ボタンを長く押すと現在時刻を変更する画面が表示される。設定変更は、LCD に 1 つずつ順番に表示される項目に対し、UP ボタンと DOWN ボタンで数値を設定し、ENTER ボタンで決定する。変更した設定内容は回路内に自動的に保存される。

農試での動作確認試験で、LED 照明器の発光制御ができることを確認した。また、コントローラをビニールハウスから 200～300m 離れた事務所に設置した場合、途中に存在するビニールハウス郡の影響で、通信不良が発生した。それを避けるため、途中にあるビニールハウス内に中継器（ZigBee 規格の XBee : Router API モードに設定）を一つ設置すれば通信が可能であった。

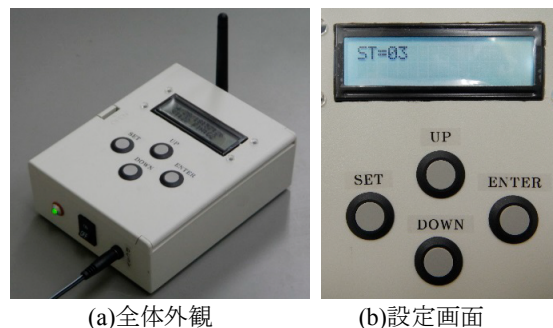


図 13 試作したマイコン版コントローラ

## 5. おわりに

本研究では、遠隔地から複数の LED 照明器を発光制御するシステムを試作した。親機として、PC またはコントローラを用意し、細かい制御を行う場合には PC を用い、現場で手軽に簡易的に制御を行う場合にはコントローラを使用する仕様とした。

農試の施設において試作した LED 照明システムを用いて、56 日間キクの電照栽培試験を行った結果、試作したシステムは電照試験開始から終了までの 56 日間正常に安定して LED の発光制御を行えた。併せて試作したシステムでの電照は、キクに対して十分な花芽抑制効果を有していた。

今後の展開としては、施設内のどこからでも遠隔操作ができるように、ローカルネットワークを構築してタブレットやスマートフォン等の携帯端末からのアクセスを検討する。また、システム全体の低コスト化などの検討を進め、施設園芸栽培や植物工場を志向する企業等に成果情報を提供し、実用化に向けた取組みを進めていく予定である。

最後に、本研究を行うにあたり実証試験にご協力

いただいた農業試験研究センターの千綿龍志氏をはじめ関係職員の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 後藤 英司：LED の植物育成分野への応用，照明学会誌，第 89 巻，第 3 号（2005）
- 2) 大坪昭文，白仁田和彦，福島章吾，田中徹，中野太郎：自然エネルギー利用低炭素型施設園芸栽培技術の開発，平成 24 年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.21，pp.29-32，（2012）
- 3) 大坪昭文，白仁田和彦，福島章吾，田中徹，中野太郎：自然エネルギー利用低炭素型施設園芸栽培技術の開発，平成 25 年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.22，pp.7-12，（2013）
- 4) 農業・食品産業技術総合研究機構，鹿児島県農業開発総合センター：キク電照栽培用 光源選定・導入の手引き
- 5) 取扱説明書 ソーラーパネル充放電コントローラー SPC-003，福島電機
- 6) 太陽電池活用の基礎と応用，CQ 出版社