

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 照明技術の試作－（第 2 報）

生産技術部

大坪昭文 白仁田和彦 福島章吾

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 照明器の設計と制御技術について検討し LED 照明器の試作を行う。本年度はまず、施設園芸用ハウスにおいて、LED 照明での電照栽培を目的として、電照時間を管理するためのシステムを、マイコンにより実現する方法を検討した。その結果、発光パターンを制御する一台のマイコン版コントローラ（親機）と、複数の LED 照明器（子機）からなる LED 照明の発光パターン制御システムを試作した。本コントローラは、長距離通信が可能な RS-485 回線で最大 31 個の LED 照明器を接続できる。また、LED の安定動作のための放熱設計において、 ΔVf 法によるジャンクション温度（LED チップ接合部の温度）の推定方法について検討し、LED 照明器の試作を行った。

1. はじめに

佐賀県内の施設園芸では、出荷時期や品質調節を図るため、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が、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。特に LED 照明は植物の成長に影響する特定の波長(色)の光¹⁾を照射することができ、施設園芸用の有望な照明器具としての期待が大きい。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がほとんどなく、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 照明の有効性を検証するため、LED 照明器の設計と制御技術を研究し、施設園芸用の LED 照明器の試作を行う。

平成 24 年度は、パソコンで LED 照明器の光量や発光時間などの発光パターンを制御するシステムを試作した²⁾。本年度は施設園芸の現場において使用できるようにするため、マイコンで同一の LED 照明器の発光パターンを制御するシステムを試作した。また、LED 照明器の安定動作のための放熱設計においても、 ΔVf 法³⁾によりジャンクション温度（LED チップ接合部の温度）を推定する方法で LED 照明器を設計・試作し、発光パターン制御試験を行った。

2. システムの構成

2.1 システムの設計方針

本研究においては、パソコン（以下 PC）、マイコン版コントローラ及び LED 照明器で構成する LED 照明の発光パターン制御システムを設計する。施設園芸の現場においてマイコン版コントローラを単独で動作させるために、以下の目標仕様を示す。

- ・発光パターンの作成は PC で行うこと
- ・PC からマイコン版コントローラへ発光パターンを転送できること
- ・マイコン版コントローラは発光パターンを保存できること
- ・マイコン版コントローラは日付、時間を管理できること
- ・マイコン版コントローラは LED 照明器と通信できること
- ・マイコン版コントローラは LED 照明器の発光パターンを制御できること
- ・マイコン版コントローラは LED 照明器の発光パターン制御の様子を確認（モニタリング）できること
- ・簡便かつ低コストのシステムであること

そこで、以上の仕様を満足させるためのシステム構成を図 1 に示す。

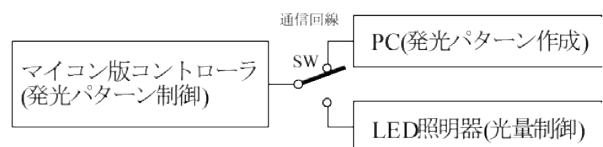


図 1 LED 照明の発光パターン制御システムの構成

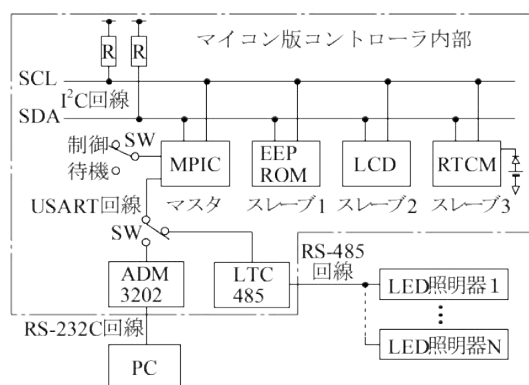


図2 マイコン版コントローラの構成

具体的には、PCで発光パターンを作成し、通信回線のスイッチ(SW)をPC側に設定し、マイコン版コントローラに発光パターンを転送する。次に、SWをLED照明器側に切り替え、発光パターンに従ってマイコン版コントローラからLED照明器へ光量の指令を送る。

PCとマイコン版コントローラ間の通信回線はRS-232C、マイコン版コントローラとLED照明器間の通信回線はRS-485とする。マイコン版コントローラにおいて、発光パターンを保存するために不揮発性メモリのEEPROMを、発光パターンの日時と比較するためにリアルタイムクロックモジュールを、発光パターン制御のモニタリングには液晶表示器を用いる。

2.2 マイコン版コントローラの構成

試作したマイコン版コントローラの構成を図2に示す。

本コントローラで使用する各デバイスは、シリアル通信規格の一つであるI²C(Inter-Integrated Circuit)が用いられている。ここで、マスターデバイスとしてPICマイコン(以下MPIC)はPIC16F876A、スレーブデバイスとしてリアルタイムクロックモジュール(以下RTCM)はRTC-8564NB、不揮発性メモリ(以下EEPROM)はAT24C1024、液晶表示器(以下LCD)はACM1602N1を用いた。

また、外部PCやLED照明器との通信のために、RS-232C通信はインターフェースICのADM3202を、RS-485通信はトランシーバーICのLTC485を通信変換デバイスとして用いた²⁾。

2.3 各デバイス間のI²C通信

I²Cは、主に近距離のデバイス(同一基板上のIC)間通信に利用されており、本システムでは、図2に示すようにSCL(シリアルクロックライン)とSDA(シリアルデータライン)の2本のバスライン上に

複数のデバイスを接続する。なお、SCL、SDAは共に抵抗でプルアップする。

各デバイスの動作モードには、マスターモードとスレーブモードがあり、通信を開始するデバイスがマスター、通信先に選択されたデバイスがスレーブとなり、同時には1対1で通信を行う。各デバイスには、バス上で一意になるアドレスを付与し、マスターはこのアドレスを指定して通信先のデバイスを選択する。ここでは、MPICをマスター、EEPROMやRTCMなどをスレーブとする。

RTCMは、32.768MHzの水晶振動子を内蔵したI²C接続方式のリアルタイムクロックモジュールであり、年月日時分秒のカレンダー・時計カウンタ機能のほか、アラームやタイマ割り込み機能を有する。消費電流は275nA/3Vと小さく、主電源が切れている間は3Vのボタン電池に切り替えて動作させ続けられる。スレーブアドレスは7ビット固定値で「1010001」(2進数)となっている。

EEPROMは、ユーザーが内容を書き換え可能なROMであり、印加する電圧を読み取りのときよりも高くすることで何回も記憶内容の消去・再書き込みが可能である。今回使用しているEEPROMは、1Mビット(128kバイト)の容量を有する。スレーブアドレスは2つのピンの状態により4通りの設定ができ、ここでは7ビット「1010100」(2進数)とした。

LCDは、キャラクタ16文字×2行を表示できるディスプレイである。スレーブアドレスは7ビット固定値で「1010000」(2進数)となっている。

MPICには、通信機能のI²CとUSARTを有するワンチップマイコンのPIC16F876Aを用い、システムクロックは10MHzとした。スレーブデバイスとの通信はI²C通信手順に従って行うが、各スレーブデバイスでの処理時間が異なるため、プログラムで適切な待ち時間を入れるという調整作業を行った。

3. LED照明の発光パターン制御システムの動作

3.1 LED発光パターンの入力

複数のLED照明器について、時間毎に発光量を設定した発光パターンは、タイムテーブル形式で管理する。ここでは、Excelシート上でLED照明器の接続の有無や時間毎のPWM制御のデューティ比を設定する。図3に24時間周期における複数のLED照明器の発光パターン例を示す。

Excel上の発光パターンはRS-232C回線を通じてPCからマイコン版コントローラへ転送する。図4

	A	B	C	D	E	F	G	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	ON	OFF															
2	LED発光制御表(24時間)																
3	アドレス	接続	STAT	1.00	2.00	3.00	4.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	23.59
4	01	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	02	ON	--	0	10	20	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	03	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	04	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	05	ON	--	100	100	100	90	0	100	100	100	100	0	0	0	0	0
9	06	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	07	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	08	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	09	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	10	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	11	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	12	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	13	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	14	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	15	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	16	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	17	OFF	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図3 LED発光パターンの設定画面

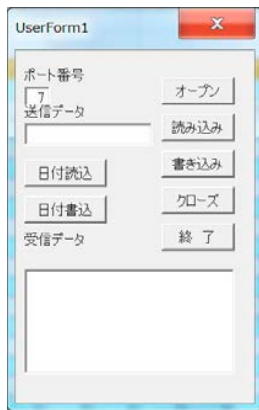


図4 LED発光パターンの転送フォーム画面

はVBAで作成したフォーム画面である。「書き込み」ボタンを押すと、Excel上の発光パターンがマイコン版コントローラのEEPROMに書き込まれる。なお、Excelの新しいシート上で「読み込み」ボタンを押すと、EEPROMに書き込まれた発光パターンを読み込んでシート上に表示し、書き込まれたデータを確認できる。

また、「日付読込」ボタンを押すと、マイコン版コントローラのRTCMの現在日時を読み込みテキストボックスに表示する。「日付書込」ボタンを押すと、日時設定画面が開き、そこで日時を設定するとマイコン版コントローラのRTCMの日付を書き換えることができる。

3.2 LED発光制御

マイコン版コントローラでは、制御モードと待機モードをスイッチで切り替える。待機モードでは、RTCMの日時をLCDに表示する。また、制御モー

ドでは、RTCMの時刻と発光パターンの設定時刻を常時比較し、設定時刻になったら接続されている複数のLED照明器に対して、LEDアドレスとその発光量がRS-485回線を通じて送信される。LED照明器では、受け取ったLEDアドレスが自身と一致した場合のみ、その発光量になるようにPWM制御のデューティ比を変更する。

4. LED照明器の試作

4.1 ΔV_f 法によるジャンクション温度の推定

LED照明器を試作する際、LEDの劣化を抑えるために、ジャンクション温度(LEDチップ接合部の温度)に注意しなければならない。LEDの定格温度は135℃となっているが⁴⁾、さらに安全性を考慮し100℃以下を基準とする³⁾。ここでLED照明器は、夏場のハウス内で使用することを想定しており、その際周囲温度が40℃まで上昇することも考えられる。ジャンクション温度を100℃以下に保つには、温度上昇を60℃以内に抑えなければならない。室内における周囲温度20℃の条件下では、ジャンクション温度80℃以下を目標とする。

ジャンクション温度は直接測定することが困難なため、ここでは ΔV_f 法³⁾を用いて間接的に推定を行う。 ΔV_f 法は、LEDのジャンクション温度がLEDの順電圧に比例する特性があることを利用し、順電圧を測ることでジャンクション温度を推定する方法である。

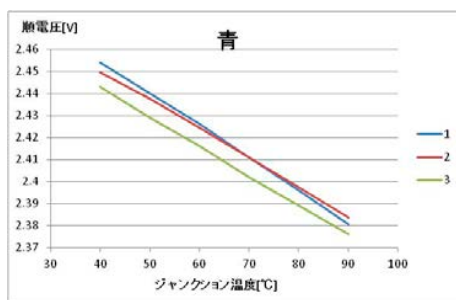
そこで、恒温槽を用いてLEDの温度を任意の温度に保ち(恒温槽内の温度=ジャンクション温度)、ジャンクション温度の上昇に影響しない1mA程度の微弱な電流を流した時の順電圧を測定し、ジャンク

表 1 LED 青の仕様

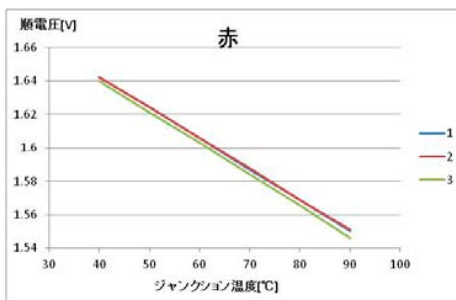
波長	470nm
全光束	30 ルーメン／700mA
順電圧 Vf	3.0~4.0V／350mA
	3.5~4.5V／700mA
半値角	120 度

表 2 LED 赤の仕様

波長	625nm
全光束	80 ルーメン／700mA
順電圧 Vf	2.0~3.0V／350mA
	2.5~3.5V／700mA
半値角	120 度



(a) LED 青の場合



(b) LED 赤の場合

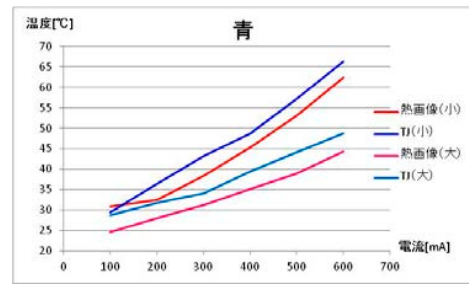
図 5 ジャンクション温度と順電圧の関係

ジャンクション温度と順電圧の関係を求めた。

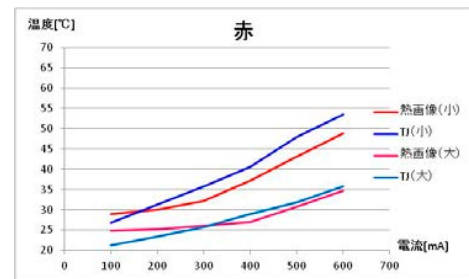
LED は OPTOSUPPLY 社製 3W 基板付パワーLED の青 (表 1) と赤 (表 2) をそれぞれ 3 サンプルずつ使用した。恒温槽内の温度を 40~90℃まで 10℃間隔で変化させた時の順電圧の測定結果を図 5 に示す。図 5 から、ジャンクション温度と順電圧が比例関係にあることがわかる。この LED のジャンクション温度は、図 5 の結果を使うことで、順電圧から推定することができる。

4.2 LED の表面温度とジャンクション温度の比較

△Vf法は、ジャンクション温度を推定する上で信



(a) LED 青の場合



(b) LED 赤の場合

図 6 LED の表面温度とジャンクション温度 (Tj) の比較

頼性が高い方法だが、煩雑な手順を踏む必要があり実用的ではない。そこで、赤外線熱画像計測装置 (日本アビオニクス製: TVS-200EX, 以下では熱画像計測装置と表記) で LED の表面温度を測定して、△Vf 法で推定したジャンクション温度と比較することで、簡易的にジャンクション温度の予測が可能か否かを検討した。

LED は 4.1 節と同じサンプルを使用した。LED に放熱能力の異なる 2 種類のヒートシンク (大:40.5cm³, 小:6.4cm³) を取り付けて、電流量を 0~600mA まで 100mA 間隔で変化させた時の LED の順電圧と表面温度を測定した。順電圧は、設定した電流値を 5 分間維持した後に、電流値を 1mA に切り替えて測定した。ジャンクション温度は図 5 の関係をもとに順電圧から推定したものである。図 6 にジャンクション温度と熱画像装置で測定した表面温度との関係を示す。なお、図 6 は青と赤それぞれ 3 サンプルの中で、ジャンクション温度と表面温度の差が、最も大きかったサンプルの結果である。今回使用したサンプルでは、LED 表面温度がジャンクション温度より最大 5℃程度低くなっていることがわかる。サンプル数は少ないが、LED のジャンクション温度は熱画像計測装置による測定温度より約 5℃高いと予測される。

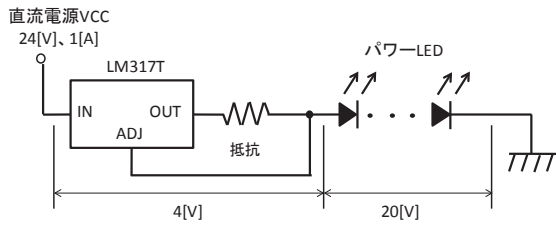


図 7 LED 駆動回路

4.3 LED 照明器の試作及び制御試験

市販の LED 照明用アルミ製ヒートシンク（入手先：LED Ecology WebShop, 大きさ：60×23.5×300mm）に 4.1 節で使用した LED を取り付けて、LED 照明器を試作した。図 7 に駆動回路を示すが、DC24V 電源に対し LM317 を用いた定電流回路で 4V 消費するので、LED で 20V まで使用できる。したがって、青の LED は 600mA 駆動時の順電圧が 3.6V なので 5 個使用でき、赤の LED は 600mA 駆動時の順電圧が 2.4V なので最大 8 個まで使用できるが、スペースの関係上 LED を 7 個とした。

LED を 600mA で駆動させ、試作した LED の表面温度を熱画像計測装置で測定した結果、青は 47°C、赤は 41°C となった。4.2 節で述べたとおり、これらの結果に +5°C して、ジャンクション温度を予測すると、青が 52°C、赤が 46°C となりアルミ製ヒートシンクの放熱性能は十分と言える。

LED 照明器を平成 24 年度に試作した PWM 制御回路²⁾に接続し、マイコン版コントローラと通信回線で接続して、24 時間周期の発光パターンの制御試験を実施した様子を図 8 に示す。この試験結果から複数の LED 照明器を本コントローラだけで遠隔制御できることが分かった。

5. おわりに

本研究では、複数の LED 照明器を遠隔調光するマイコン版コントローラを、ワンチップマイコンの PIC、EEPROM、リアルタイムクロックなど、安価なデバイスを組み合わせて試作することに成功した。本コントローラは、パソコンを使わずに単独で LED 照明器の発光パターン制御ができるため、現場への持ち込みが容易となった。

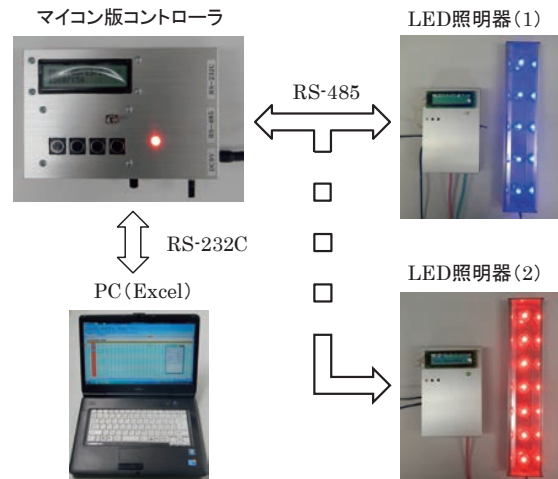


図 8 マイコン版コントローラによる LED 照明器の電照制御試験

また、LED 照明器を設計・試作する時の放熱性能評価のため、 ΔVf 法による LED のジャンクション温度を推定し LED の表面温度と比較する手順を示した。

今後は、有線通信回線から無線通信規格 ZigBee を使用した無線通信回線への変更や施設園芸用の発光パターンを組み込んだ LED 照明の制御システムの作製、及び試作した LED 照明器の施設園芸用ハウスにおける検証を行い、より使い易いものに改良を重ねていく予定である。

なお、本研究を実施するにあたって使用した低温恒温恒湿装置は、電源立地地域対策交付金で導入した。

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) LED 照明推進協議会編：LED 照明信頼性ハンドブック，日刊工業新聞社
- 4) 山崎浩：省エネ LED/EL 照明設計入門，日刊工業新聞社