

# 局所加温ステンレス箔テープヒータの 管理運用に適したセンサネットワークシステム

山田 健仁<sup>\*1</sup> 岡林 拓矢<sup>\*2</sup> 鶴山 浄真<sup>\*3</sup> 御旗 寛<sup>\*4</sup>

## The Sensor Network System Suitable for The Management and Operation of The Local Heating Stainless Steel Foil Tape Heater

Takehito YAMADA<sup>\*1</sup>, Takuya OKABAYASI<sup>\*2</sup>, Johshin TURUYAMA<sup>\*3</sup>,  
and Hiroshi MIHATA<sup>\*4</sup>

### Abstract

A growth monitoring in horticulture has become an important technology for an efficiency of agricultural work, a quality improvement and a safety of an agricultural products. Recently, in order to achieve environmental monitoring efficiently corresponding to a scale of a greenhouse, sensor network technology using a network communication has become a major technique. In this study, we propose a sensor network system which is suitable for the management and operation of a local heating stainless steel foil tape heater in the efficient growing of the strawberries. The system is constructed by a gateway used the Linux-OS based Raspberry Pi computer, and small sized sensor modules which include a ZigBee wireless device.

**Key Words :** Sensor network, Tape heater, Spot heating, Horticulture

### 1. はじめに

温室栽培などの施設園芸における生育環境モニタリングは、農作業の効率化、農産物の品質向上や安全確保に重要な技術となってきている。近年では、温室の大型化に対応し、生育環境モニタリングを効率的に運用するためにネットワークを活用したセンサネットワーク技術が導入されるようになってきており、精密農業や植物工場が実用的な段階になってきている<sup>1)</sup>。

一方、筆者らの研究グループでは、作物の効率的な生育を目指した局所加温ステンレス箔テープヒータ（以下 テープヒータ）システムを開発し、温室栽培の高機能化、省エネルギー化を推進している<sup>2), 3)</sup>。その際、大規模化が進んでいる温室内において、広範囲、多点での詳細な生育環境モニタリングを実現することは、テープヒータ活用による省エネルギー化などの効

果をより詳細に評価・運用することに繋がるとともに、作物の生育条件をより詳しく観測する技術の開発にも繋がる。

本研究では、テープヒータ使用時の栽培温度測定を中心とした、小形・低消費電力・低コストのセンサネットワークの構築を目指す。特に、施設園芸におけるテープヒータ普及のための対象作物としているイチゴの株元加温システムの評価に適したセンサネットワークシステムの構築とビニールハウス内での実用性を長期間での実証試験で明らかにすることを研究の目的とした。このシステムを発展させることにより、従来の栽培環境モニタリングシステム<sup>4)</sup>とは異なり、植物体近傍を栽培圃場全域にわたって細かくモニタリングすることが可能となり、作物の生育環境条件のより詳細な検討ができるようになると思われる。

<sup>\*1</sup> 情報電子工学科

<sup>\*2</sup> 情報電子工学専攻

<sup>\*3</sup> 山口県農林総合技術センター

<sup>\*4</sup> 新立電機株式会社

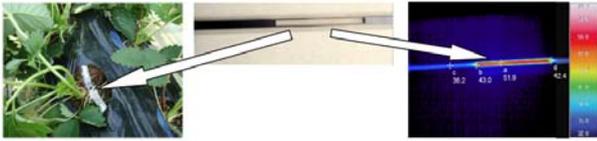


写真1 局所加温テープヒータの敷設例



写真2 検証実験で使用したイチゴ栽培用温室  
(山口県農林総合技術センター実験用圃場)

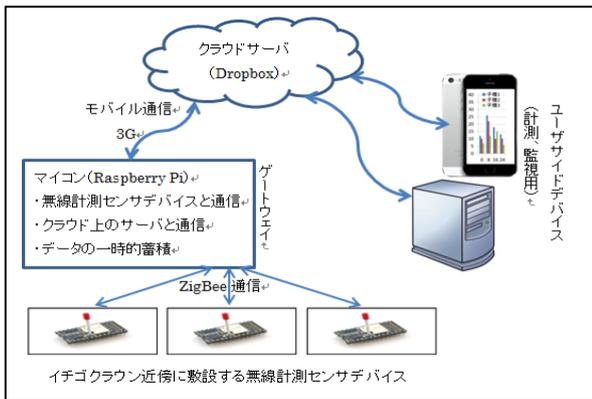


図1 センサネットワークの全体構成図

## 2. 実験システムの概要

写真1は、イチゴ株元にテープヒータを敷設した例である。写真1右側のサーモグラフィから分かるように、イチゴの株元部分で局所的に発熱する構造となっている。テープヒータは、イチゴの株元を局所的に加温するために株元に沿うように配置され、約30mから50m長の栽培地もしくは栽培棚にわたって設置される(写真2参照)。テープヒータの温度制御では、一列に植栽されたイチゴの代表株元の温度を検出して、テープヒータの通電量(発熱量)を決定する簡易な制御方式を採っている。大規模な温室では、このように植栽されたイチゴの株列が数十列設置されており、温室の環境管理は温室の一部に設置された栽培環境モニタリングシステムなどで行われている。

本研究では、植物体近傍の温度を栽培圃場全域にわたって、より詳細にモニタリングするシステムの開発

表1 TWE-Liteの無線仕様, 主要インターフェース, およびマイコンの機能

無線規格	IEEE802.15.4準拠	周波数帯	2.4GHz
チャンネル数	16チャンネル	変調方式	O-QPSK, DSSS
通信速度	250kbps	送信出力	+2.5dBm @3V
受信感度	-95dBm @3V	暗号化	AES-128, AES-256
UART	2ポート	I2C	1ポート
SPI	3セレクト	A/D	10bit 4チャンネル
PWM	4ポート	コンパレータ	2ポート
ウォッチドッグタイマ	乱数発生器		
ウェイクアップタイマ	電圧監視リセット回路		

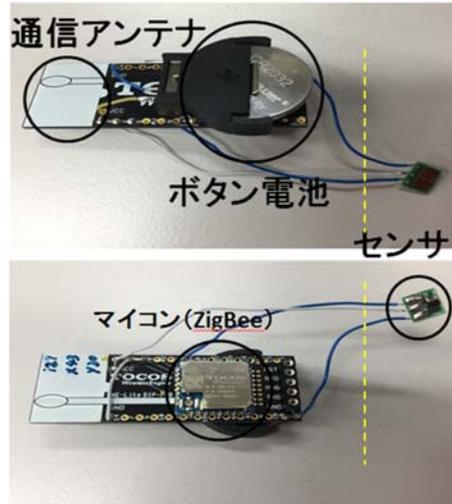


写真3 センサデバイスの構成



写真4 イチゴ株元へのテープヒータとセンサデバイスの敷設例

を目指している。図1に試作したセンサネットワークの全体構成図を示す。無線計測センサデバイス(以下センサデバイス)の通信モジュールには、TWE-Lite(MONO WIRELES製)を使用した。表1にTWE-Liteの主要諸元(無線仕様, 主要インターフェース, およびマイコンの機能)を示す。この通信モジュールには、マイコンが搭載されておりA/D変換機能も有している。このA/D変換チャンネルにCMOS温度センサS-8120C(SIIセミコンダクタ製)を接続することで温度計測が可能となる。

写真3にセンサデバイスの構成を示す。TWE-Lite,

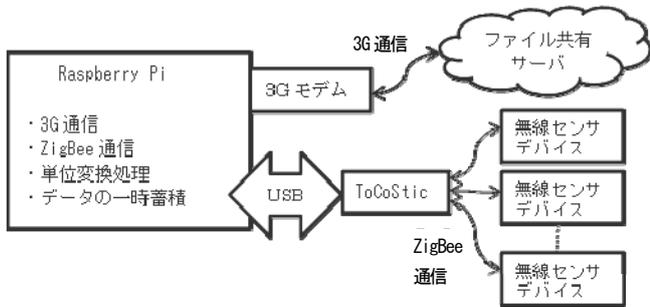


図2 ゲートウェイとセンサデバイスの構成図

温度センサ、ボタン電池という非常に簡単、且つ、低コストで実装できるようになっており、多点・広域計測を必要とする大規模圃場用のセンサデバイスとして適している。

写真4は、センサデバイスをプラスチック容器に封入し、イチゴの株元に敷設した例である。デバイス全体は、プラスチック容器に封入されており、容器の外部底面には樹脂被覆と接着剤で固定された温度センサが設置されている。温度センサからの配線は、容器を貫通してセンサデバイスのA/D変換チャンネルに接続されており、配線のための貫通部は接着剤で封止している。また、プラスチック容器周囲には、このセンサデバイスを培土に固定するためにU型固定ピン(写真4の赤い部分)を接着配置している。

温度センサで計測しA/D変換されたデジタル温度データは、ZigBee通信により30秒間隔で各デバイスから、簡易なマイコンボード(Raspberry Pi)を中心として構成したゲートウェイのZigBee受信機ToCoStick(MONO WIRELES製)に向けて送信される。

ゲートウェイとセンサデバイスの構成図を図2に示す。ゲートウェイの主要構成モジュールは、マイコンボードのRaspberry Pi、USBポートに接続したToCoStick、マイコンボードの拡張コネクタに接続した拡張ボードである3G通信モジュールの3GPI(メカトラックス製)から成る。なお、ToCoStickの主要部品はTWE-Liteであるため、主要諸元はUSBインターフェース部を除いて表1と同じである。

マイコンボードRaspberry Piは、小形・安価な高性能マイコンボードでLinuxベースのOSであるRaspbianの管理下で動作する。また、ToCoStickのUSBインターフェースに適合していることから、ゲートウェイの制御ボードとして選定した。なお、各モジュール等の動作プログラムは、スクリプト言語のPythonプログラムにより記述した。ゲートウェイは、以下の処理を行う。

- ① 多数のセンサデバイスからの温度データ、電源電圧等の計測情報を受信
- ② NTP(Network Time Protocol)による時刻管理

- ③ 温度データ等の計測情報にタイムスタンプを付加し、CSV形式のファイルとして一時的に蓄積

- ④ 3G通信により、CSVファイルを5分間隔でクラウドサーバ上のサービスであるDropbox<sup>5)</sup>に送信

3Gでのモバイル通信はインターネット回線へ直接アクセスする構成とした。Dropboxは、オンラインストレージサービスで、クラウド上のストレージとローカルにある複数のユーザサイドデバイスとの間でデータの共有や同期ができる。従って、クラウド上のストレージデータを適宜ユーザサイドデバイスにコピーすることで、データの管理保管が容易にできる。なお、Dropbox上に保存されたファイルはCSVファイル形式としたため、表計算ソフトのExcel等に読み込むことで、詳細な分析やグラフ化が容易に可能である。

### 3. 通信距離に関する基礎検討

TWE-Lite(送信側)とToCoStick(受信側)で構成されたセンサデバイスとゲートウェイ間は、双方が地面から1mの高さを確保できれば、仕様上約100mの通信が可能となっている。しかし、センサデバイスのTWE-Liteを地表面に置いた場合、通信距離が短くなることが仕様説明で挙げられている。そこで、イチゴの露地栽培を想定し、TWE-Liteの地表面設置時の通信可能距離を計測・評価する実験を行った。

遮蔽物のない平地にゲートウェイ(ZigBee受信機ToCoStick)を高さ1mの台に設置し、送信側のTWE-Liteを地表面に設置した。この状態でTWE-Liteのデータ送信間隔を10秒間に設定し、ゲートウェイからの距離を離しながら受信状態を測定した。受信状態の評価は、ある距離でセンサデバイスの送信設定時間間隔とゲートウェイが10回受信したときの受信時間間隔との平均誤差時間を計測することで行った。

図3にTWE-Liteを地表面に設置した場合とゲートウェイと同じ高さに設置した場合の実験結果を示す。送信設定時間間隔と受信間隔との誤差の増加は、電波品質の劣化に関係しており、図3に示す実験結果から、TWE-Liteを地表面に設置した場合、TWE-Liteとゲートウェイ間の通信距離(ZigBee送受信距離)は、20m以下が適当であることが分かった。センサデバイスとゲートウェイ間の通信距離が20m以下とすると圃場全域での実用的な運用は難しい。これを解決するには、TWE-Liteに搭載されている中継機能を利用する方法が考えられ、原理的には可能であることは仕様から分かる。しかし、受信側の処理アルゴリズムが複雑になるため今後の課題とし、以下の圃場環境下での実験では、ZigBee送受信距離を20m以下となるように設定した。

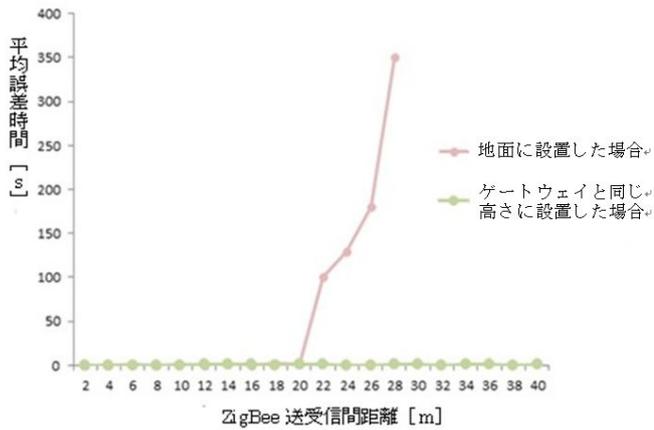


図3 センサデバイスとゲートウェイ間の距離と送信設定時間間隔と受信時間間隔の平均誤差

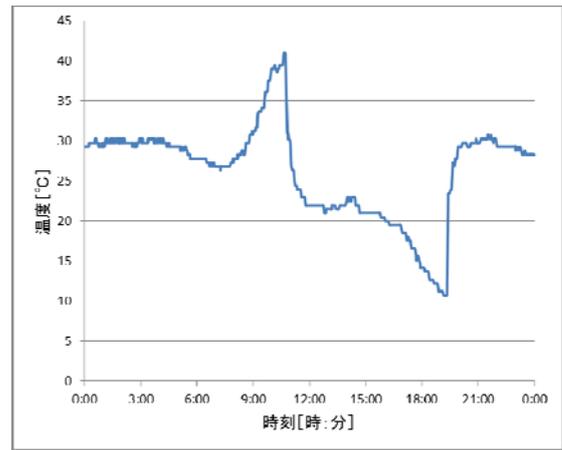


図4 イチゴ株元温度の変動 (2016年2月21日)

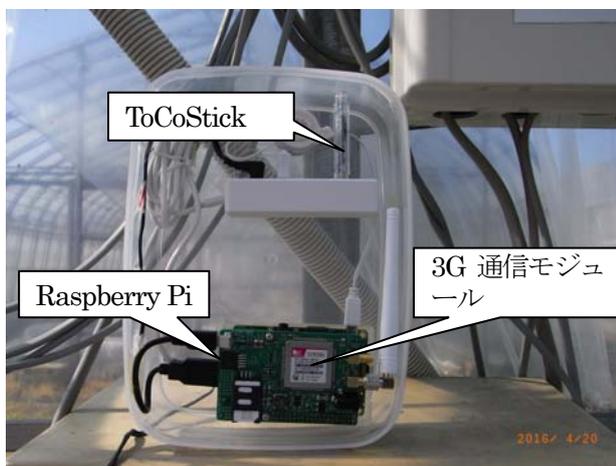


写真5 ビニールハウス内に設置したゲートウェイ

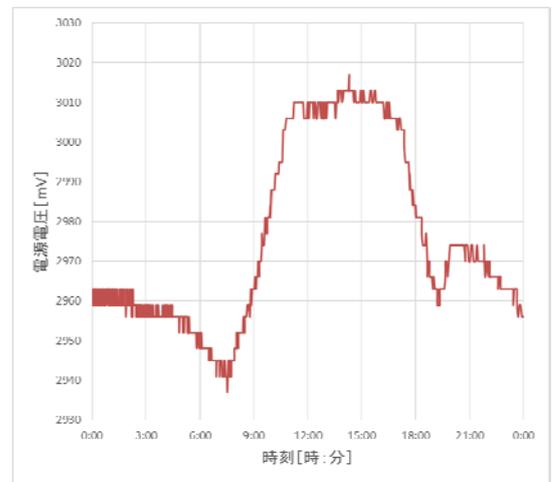


図5 センサデバイス電源電圧変動(2016年2月21日)

#### 4. ビニールハウス圃場環境での稼働実証試験

センサネットワークを構成する装置一式(センサデバイス15個, ゲートウェイ1台, ACアダプターなど)を試作し, 山口県農林総合技術センター内のイチゴ栽培ビニールハウスにおいて, 平成28年2月3日から4月20日の期間で, 圃場環境での稼働実証試験を行った。

写真5にビニールハウス内に設置したゲートウェイを示す。ゲートウェイは, Raspberry Pi (マイコンボード), ToCoStick (ZigBee受信モジュール), 3G通信モジュールより構成されており, 樹脂製の防湿ケースに格納している。また, ゲートウェイは高さ1m程度の台の上に設置し, センサデバイスとの距離は, 最大でも10m程度の通信距離となるように配置し, 電波品質に関しては問題ない状態とした。

図4, 図5は, イチゴ株元の温度データ時系列とセンサデバイスの電源電圧変動の時系列をグラフ化した例である。イチゴの株元にはON/OFF制御されるテープヒータが敷設されているため, 観測した温度データの時



写真6 固定ピンが脱落したためにセンサデバイスが倒れた様子

系列には, ビニールハウス内温度の変動とON/OFF制御されたテープヒータによる温度変動の総合的な状況が表れている。

今回は, システム全体の稼働実証試験を目標とした。このため, 計測温度の確度に関しては不明確であり,

今後、ビニールハウス内温度の測定や校正を行った温度計を使用しての詳細な計測評価を行う必要がある。

また、図 5 のセンサデバイスの電源電圧変動の時系列は、電池の消耗状態の指標になるものと考え測定したものである。電源電圧変動のデータからセンサデバイスの稼働寿命を予測することを考えたが、TWE-Lite の仕様から予測される通信時における電源変動の値以上に変動することが分かった。この変動要因としては、センサデバイス周囲の温度変動などの影響が考えられるが、実用化に向けてはより詳細な検討が必要である。

写真 6 は、固定ピンの接着部が剥がれて脱落したためにセンサデバイスが倒れた様子である。この他にも固定ピンの折れ曲がりなどが観察された。設置した 15 個のセンサデバイスにおいて、6 個がこのような状態となった。株元に設置したセンサデバイスは、イチゴの葉に覆われてしまうため、農作業中においてセンサデバイスの存在は認識し辛く、不用意な荷重がかかる状況が生じたものと考えられる。また、通信アンテナ（写真 3 参照）は、地面に対して鉛直方向に立てる必要があるため、センサデバイスを収めたプラスチック容器の形状を縦長の円筒状にしたが、これも株元の設置に適していなかったようだ。実用性を考えると通信アンテナの形状変更や容器を横長にするなどの変更が必要であることが分かった。

また、ビニールハウスの圃場は高温多湿なため、湿気の浸潤により、多数のセンサデバイスのプラスチック容器内で結露状態が観察された。今回の 2 ヶ月程度の圃場環境試験では、電子部品の劣化は観察されずセンサデバイスの動作には影響は見られなかった。しかし、湿気の浸潤による電子部品の劣化や電池の腐食などが想定されるため、より密閉度の高い防湿容器が必要であることも明らかとなった。

## 5. まとめ

無線計測センサデバイスについては、実用的なモジュールを低コストで製作可能であることについて実証できたが、センサデバイスの試作がシーズン初期からの設置に間に合わなかったため、1 シーズン（約 5 ヶ月）にわたって、ボタン電池 1 個でデータ送信できる性能に関しては検証できなかった。

本実験により、局所加温ステンレス箔テープヒータの管理運用に適したセンサネットワークの基本構成とその通信やデータ管理面での妥当性は確認できた。実用化にむけては、無線計測センサデバイスの電源、無線計測センサデバイスの防湿容器構造、アンテナの向きを考慮した容器構造と設置方式、通信到達距離など、

多くの課題が明確になった。今後、圃場での実証試験を継続し、実用化に向けた開発を進める。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人 中国電力技術研究財団の助成を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

## 文献

- 1) 中西崇文, 渡辺智暁, Innovation Nippon 研究会報告書「農業分野のデータ・イノベーション」(2015)  
[http://innovation-nippon.jp/reports/2014StudyReport\\_DataAgri.pdf](http://innovation-nippon.jp/reports/2014StudyReport_DataAgri.pdf)
- 2) 鶴山浄真, 日高輝雄, 木宮康雄, 岡田豊, 山田健仁, イチゴ局所加温用テープヒータの開発と実用化に関する研究(第 2 報)局所加温がイチゴ栽培の収量性に及ぼす影響, 園芸学会平成 23 年度秋季大会
- 3) 竹本優太, 山田健仁, 木宮康雄, 鶴山浄真, 日高輝雄, 御旗寛, ステンレス箔テープヒータによる植物体加温制御システムの検討, 徳山工業高等専門研究紀要, pp. 59-64, No. 35 (2012)
- 4) 山本敬司, 栽培環境モニタリングシステム「ハッピー・マインダー」の開発, 電気評論, 98 巻, 11 号, pp. 80-81 (2013)
- 5) Dropbox, <https://www.dropbox.com/ja/>

(2016.09.05 受理)