

## 園芸施設内固定環境計測装置の開発と耐熱設計の検討

木村竜士\*<sup>1</sup>・金村匡将\*<sup>2</sup>・中山 信\*<sup>1</sup>・高田 拓\*<sup>1</sup>

### Development and heat-resistant design for greenhouse environment monitoring system

Ryushi KIMURA, Kyosuke KANEMURA, Shin NAKAYAMA,  
and Taku TAKADA

#### Summary

Recently, the demand for a greenhouse environment monitoring system has been increasing in “smart agriculture” businesses. In this study, a fixed-type environment monitoring system was developed. The system can measure temperature, humidity, carbon dioxide, and the flux of solar radiation, and it can send data constantly using wireless communication network Wi-Fi. The prototype device was attached to a greenhouse for green pepper cultivation, and the data were measured for five days. Then, the temperature, humidity, central processing unit (CPU) temperature, and CPU utilization rate were measured inside the device to evaluate the heat-resistant design. As a result, the device operated under a harsh environment with high temperature and high humidity in the greenhouse for only the first three days without problems. In the future, to operate the device stably, exhausting heat from the CPU effectively and constantly flushing the memory of RaspberryPi4 should be considered.

#### 1. はじめに

現在、センサ技術およびセンサネットワーク技術の発展に伴い、様々な分野で多種多様なセンサが利用されている。農業において、施設園芸用のビニールハウス内にセンサを設置し、温度、湿度などを測定することでハウス内の環境を継続的に管理することが可能となっている。近年では、環境情報を収集することで作物の高収穫・高品質化を目指す取り組みが多く見られるようになった<sup>1).2)</sup>。農林水産省が積極的に進めているスマート農業は、「ロボット技術やICT等の先端技術を活用し、超省力化や高品質生産等を可能にする新たな農業」のことであるが、その中でもICTやIoT (Internet of Things) と関連した環境計測は、ロボット技術やAI技術と連動するために欠かせない基盤技術である<sup>3)</sup>。また、環境計測装置のコンピュータやセンサ類は、実用レベルの精度を維持しながら、より安価な部品で構成できるようになっている<sup>4).5)</sup>。

実際の農作業においては、天候や温湿度などの環境情報に加えて、植物の果実・葉などの数や色艶などの視覚から得られる情報に基づいて、栄養生長と生殖生長のバランスを考慮しながら病気の予防を適切に摘果や摘葉などを行っている。植物の生育情報などをよりの確に把握するためには、環境情報に加えて、視覚情報を含んだ環境計測装置が必要である。摘果や摘葉などの作業は、多地

---

\*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

\*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 5年生

点の圃場を目視巡回して実施するため、大きな農作業負担の一因である。可視カメラに関しては、安価で高精度なものが多くあり、深層学習などを利用した物体検出などに利用され始めている。今後、巡回型の環境計測ロボットや農作業補助用のロボットなどが普及していくと予測されるため、従来の環境計測装置に加えて、可視・熱画像カメラ・制御系などを兼ね備えた統合的な環境計測装置によるデータや技術の蓄積は有効であると考えられる。

一方で、施設園芸用のビニールハウスなどでの長期間計測を行う際には、カメラ特有の課題がある。ビニールハウス内では、植物の効率的な生長を促進するため、一般的な環境に比べて、高温・高湿な環境となっており、土を利用した施設では、防塵・防湿の対策が必要である。高解像度のカメラ撮影を頻繁に行う場合、コンピュータへの負荷は、装置内部での熱源となり、コンピュータの暴走や熱画像カメラへのノイズ源となる可能性がある。高湿度環境では、周囲との温度差により結露などの可能性が考えられるが、装置内の熱管理により結露を回避することは可能である。ビニールハウス内における統合的な環境計測装置の熱設計と熱管理は、妥当なデータを長期間取得する上で避けて通れない課題である。本研究では、環境情報に加えて、可視および熱画像を取得する統合的な環境計測装置を開発し、実際のビニールハウスでの性能検証を実施した。

## 2. 固定環境計測装置の構成

### 2.1 環境計測装置の概要

計測装置の構成を図1に、製作した装置の外観を図2に、使用物品を表1に示す。計測装置は、安価で入手しやすい汎用センサ、PCボードから構成する。本計測装置は、環境情報の取得に加えて、カメラモジュールを用いた可視画像と熱画像の2種の視覚情報を取得できる点に特徴がある。また、試験段階として、計測装置ケース内の温度・湿度分布を把握するため、4点の温度・湿度センサを設置している。

計測装置のPCボードとしては、制御用PCボードのRaspberryPi4とセンサ用マイコンボードのArduinoUnoを用いている。RaspberryPi4は、環境情報の取得と記録、マイコンと2種のカメラの制御、ファンへの電源供給、WiFiによるデータ送信を担っている。ArduinoUnoは、各センサから温度、相対湿度、二酸化炭素濃度、日射量のデータを取得している。また、ビニールハウス内の気温測定のため、放射シールド内に温度・湿度センサを設置し、空気循環用ファンで強制通風している。

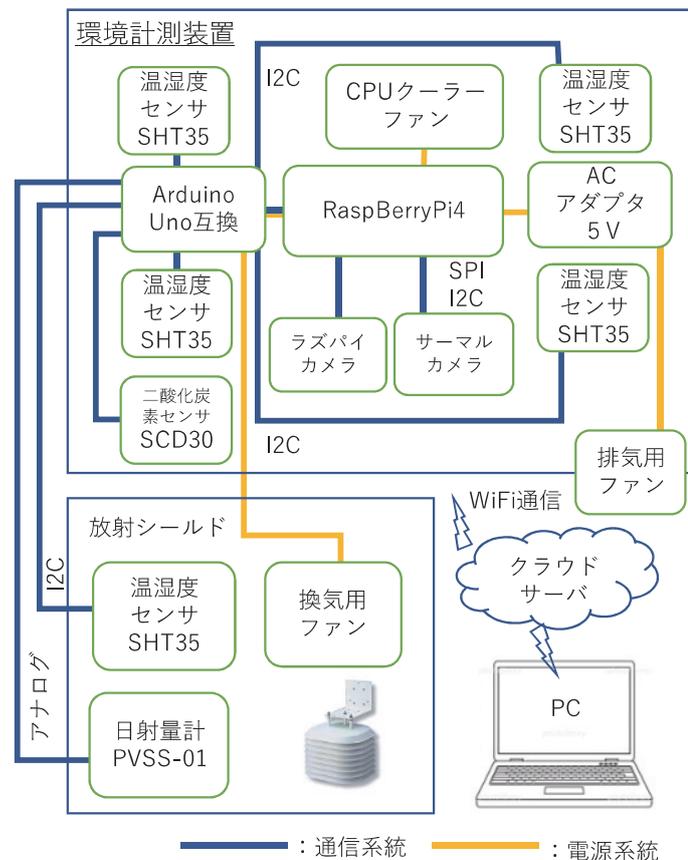


図1 計測装置の構成

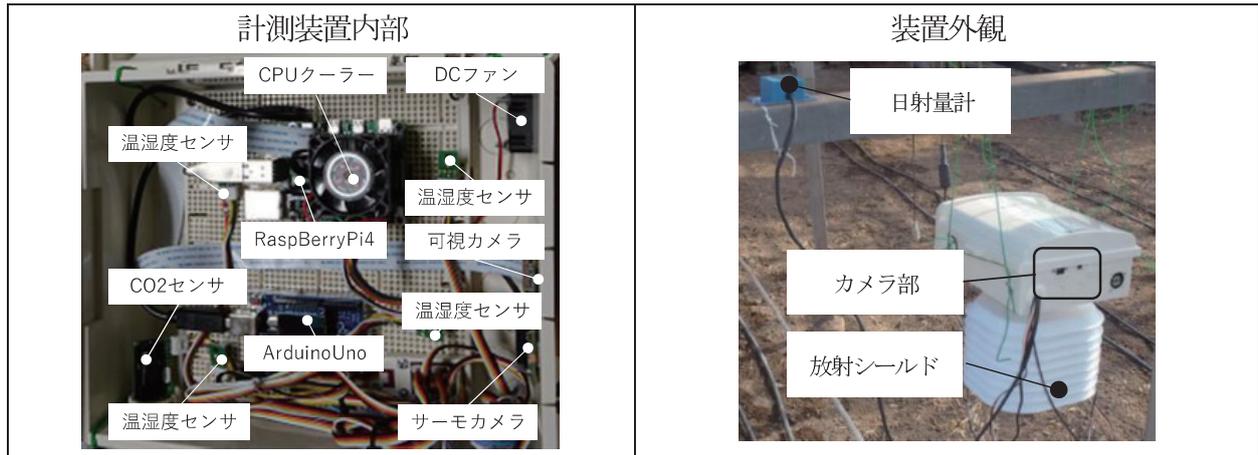


図2 計測装置の内部および外観

表1 装置の構成部品

製品名	数量	用途	メーカー
RaspberryPi4 4GB	1	制御基板	RaspberryPi 財団
ICE タワーCPU クーラー	1	RaspberryPi4 用 CPU 冷却ファン	GeeekPi
ArduinoUno 互換品	1	センサ通信用	HiLetgo
microSD カード 32GB	1	RaspberryPi4 用メモリ	SunDisk
二酸化炭素センサモジュール SCD30	1	二酸化炭素計測	Sensirion
温度・湿度センサモジュール SHT35	5	温度・湿度計測	Sensirion
PV アレイ日射計 PVSS-01	1	日射量[400nm~700nm]計測	三弘
ラズパイカメラモジュール V2.1	1	RGB 画像撮影	RaspberryPi 財団
放射温度カメラモジュール Lepton2.5	1	赤外線放射温度画像撮影	FLIR
Lepton 2.5 用ブレイクアウトボード	1	Lepton2.5 通信用	GroupGet
DC5V ファン 40 mm	2	ケース内・シールド内通風用	Sononia
放射シールド	1	放射熱低減	Davis
防水ケース WB-11DHM	1	基板・センサ収納	未来工業

## 2.2 カメラモジュールの特徴

本装置で用いるカメラモジュールを表2に示す。可視カメラとしては、RaspberryPi専用のPiCameraを用いた。PiCamera専用のコマンドが複数あり、通信・制御が容易に行える。熱画像カメラとしては、Lepton2.5を用いた。SPI通信による画像データとI2C通信による放射温度データを同時に取得できる。Python用APIが公開されており、コードの改変が容易である。

## 2.3 園芸施設内の無線通信ネットワークと環境計測装置

園芸施設内に設置する無線LANアクセスポイント (AP) としては、施設内の高温・高湿環境下における耐候性、農作業時に生じる塵埃に対する防塵性、多数の作業従事者による同時アクセスへの対応を考慮し、屋外用無線APを新たに設置した (表3)。なお、屋外用無線APへの電源供給は、PoE (Power over Ethernet) 給電であり、LANケーブルにより給電する。

園芸施設内のネットワーク構成を図3に示す。対象敷地は、高知県安芸郡芸西村にある園芸施設で、南北68m、東西86mの約6,000㎡(0.6ha)の敷地に、4棟のビニールハウスが建てられている。西端ハウスの小屋にONU(Optical Network Unit:光回線の終端装置)が設置されており、外部へのインターネット接続が可能である。また、ONUに接続された無線ルータ(RT)を起点として、各ビニールハウス内の3つの無線APまで、有線LANが敷かれている。環境計測装置は、東端ハウスに設置しており、地上から1mの高さに、レンズに直射日光が入射しないようにカメラを北向きにして設置した(図4)。今回は、データ通信の安定性確保のため、無線APから有線LANを本装置に接続した。将来的には、無線環境での安定利用を目指している。

表2 カメラモジュールの仕様および撮像例

モジュール名	仕様	撮像例 (10/15 12:00)
Raspberry Pi Camera v2.1 	解像度: 808万画素 (3280×2464) 視野角: 水平 62.2°×垂直 48.8° 動作環境: 0~70℃	
Lepton2.5 (FLIR社製) 	解像度: 4800画素 (80×60) 視野角: 水平 50°×垂直 60° 動作環境: -10℃~80℃ 精度: +/-5℃ or 5%	

表3 無線LANアクセスポイントの仕様

名称	型番	仕様
無線RT	WXR-1900DHP3 (Buffalo)	動作保証温度: 0~55℃ 動作保証湿度: 10~85%
無線AP1	WAPM-1266WDPR (Buffalo)	通信距離: 300m (スループット約100Mbps時) 動作保証温度: -25~55℃ 動作保証湿度: 10~90% 耐候性: 防護等級IP55
無線AP2・3	WSR-1166DHP3 (Buffalo)	動作保証温度: 0~40℃ 動作保証湿度: 10~85%



図3 園芸施設内のネットワーク構成

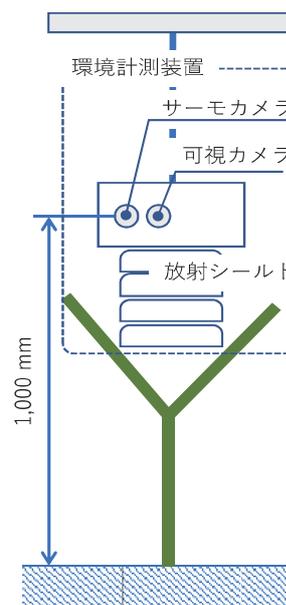


図4 計測装置の設置

## 3. 動作試験と測定データの解析

## 3.1 環境計測装置の動作確認試験

環境計測装置による測定項目と測定間隔を表4に示す。ハウス内環境は、気温、相対湿度、二酸化炭素濃度、日射量の4項目を10秒間隔、放射温度、可視画像（8万画素）、放射温度画像（4800画素）を60秒間隔で測定した。計測装置ケース内の環境測定は、温度・湿度を4点、RaspberryPiのCPU温度、CPU使用率を60秒間隔で計測した。データは、ラズパイ内SDカードに保存した。計測装置の動作確認は、リモートデスクトップアプリケーションソフトTeamViewerを使用することで高知高専内のPCから芸西村にあるRaspberryPiにリモートアクセスし、1日1回程度実施した。

表4 測定項目

項目[単位]	対象	測定間隔[sec]	備考
温度[°C]	ビニールハウス内環境	10	
相対湿度[%]			
二酸化炭素濃度[ppm]			
日射量[W/m <sup>2</sup> ]			
放射温度[°C]		60	測定点 4800 点
可視画像			解像度 8 万画素
放射温度画像			解像度 4800 画素
温度[°C]	ケース内環境	60	4 点
相対湿度[%]			4 点
CPU 温度[°C]			
CPU 使用率[%]			

## 3.2 計測データについて

動作確認のための計測は、2020年10月13日10:00に開始し、10月16日に後述するエラーが発生したため、10月15日までの約2日半分のデータが取得できた。図5に、10月15日から16日にかけての各種センサデータを示す。10月15日までは、日射量、温度・湿度、二酸化炭素濃度などのデータが取得できている。10月15日は晴天であり、日の出後に日射量が増加し、昼頃から徐々に減少し、日没前には非常に小さくなっている。計測装置の設置場所がハウスの東側であることから、日射量のピークが午前中の時間帯となっている。また、細かな変動は、ハウスの梁や資材などの遮蔽物によると考えられ、日射量の相対的な変動は妥当と考えられる。ただし、日射量の絶対値に関しては、今後、較正作業などにより、さらに検証する必要がある。

気温に関しては、日射量の上昇とともに増加し、昼過ぎ頃から徐々に減少している。装置内の温度データは、気温と比べて、夜間は2~3℃、日中は5℃以上高くなっている。RaspberryPi4のCPU温度は夜間で10℃程度、日中は15℃程度高くなっており、PCボードから発生した熱が装置ケース内に籠っている可能性が高い。CPU使用率は、10月15日に関しては一定の値であり、計測装置によるデータ取得に関する定期的な負荷のみであると考えられる。また、二酸化炭素濃度は夜間が高く、日の出後に窓を開けたと考えられる時間帯から急激に下がっており、日中は、一般的な屋外の二酸化炭素濃度に近い値であった。夕方以降、窓を閉めた時間帯頃から、徐々に増加している。1日の大まかな変動の様子は、想定される変動と近いが、夜間のピーク時の二酸化炭素濃度が非常に高いため、今後、絶対値の較正作業が必要と考えている。

## 3.3 計測装置の動作安定性の検証

2020年10月16日に発生したエラーについて検討する。各種データが取得できなくなった時刻には差があり、センサデータは3:11頃まで、RaspberryPiのCPUデータは11:23頃まで、熱画像は12:33

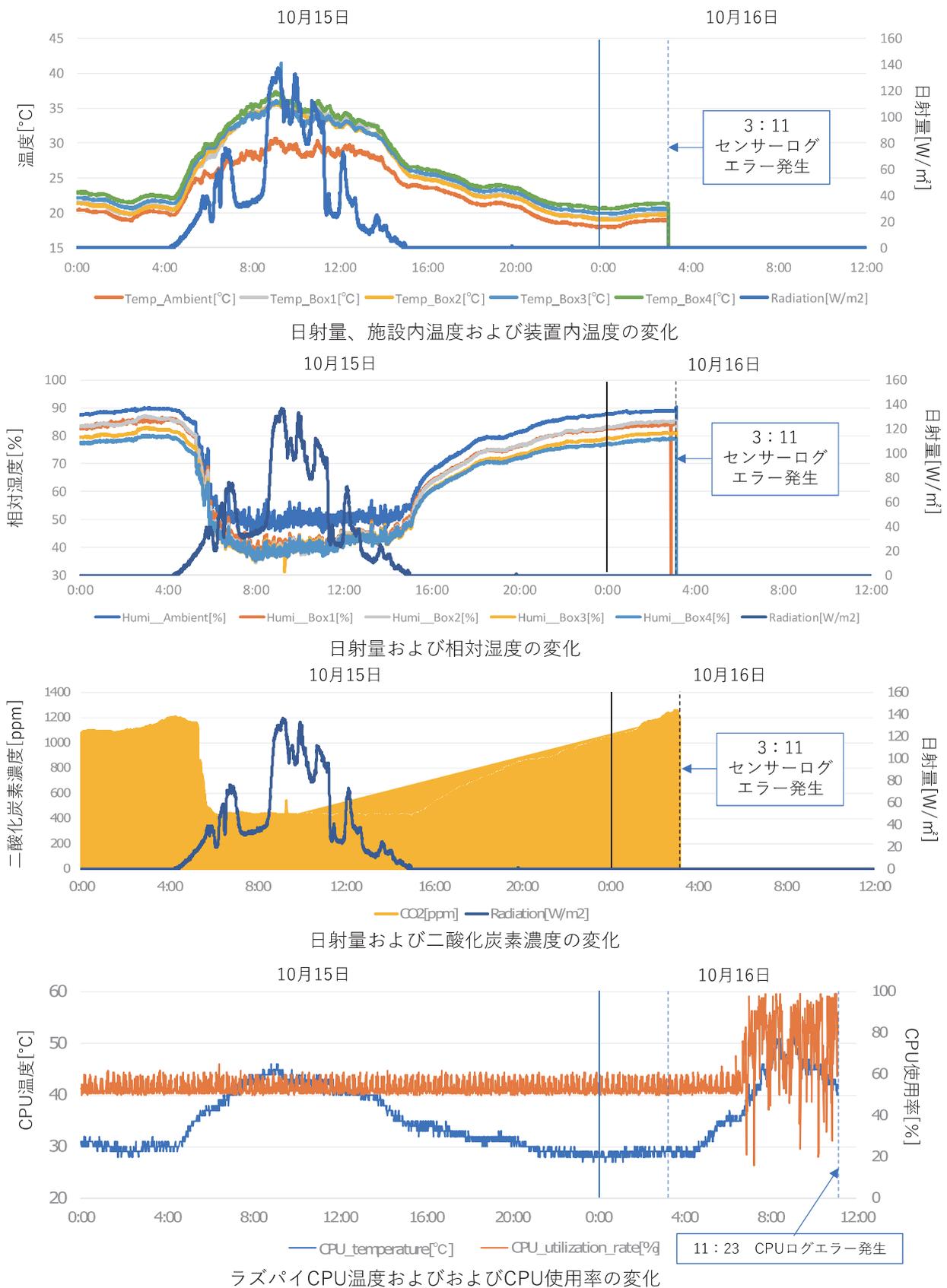


図5 日射量、施設内温度およびケース内温度（上図）、日射量および相対湿度（中上図）、日射量および二酸化炭素濃度（中下図）とRaspberryPiのCPU温度およびCPU使用率（下図）の変化（10月15日-10月16日）

頃まで、可視画像は12:53頃までであった。センサデータはArduinoで制御されていたため、Arduinoでエラーが最初に発生したと考えられる。CPUデータに関しては、データ取得が止まる前の7:00頃から、CPU温度が増加し、CPU使用率は大きな変動を繰り返し始めた。CPU温度は9:00頃までに50℃程度と、10月15日の日中のCPU温度よりもかなり高くなっている。CPU使用率は、7:00前の40~45%から7:00以降は20~100%の範囲で値がハンチングしており、最終的に11:23以降のデータ取得はなかった。その後も、しばらくは、2種類のカメラ画像は取得されていた。

#### 4. 結果の検討

今回、cのカメラを搭載した統合型の環境計測装置を開発し、動作確認試験として、ピーマン栽培のビニールハウス内での計測を行った。ビニールハウス内の環境計測という観点からは、各種センサのデータが2日半にわたって取得できており、取得データの1日の変動は妥当であると判断できた。可視カメラと熱画像カメラに関しても、画像データが取得できており、熱画像カメラの放射温度データの変動の様子も妥当であることを確認している<sup>6)</sup>。今後、さらに長期間の妥当なデータ取得を

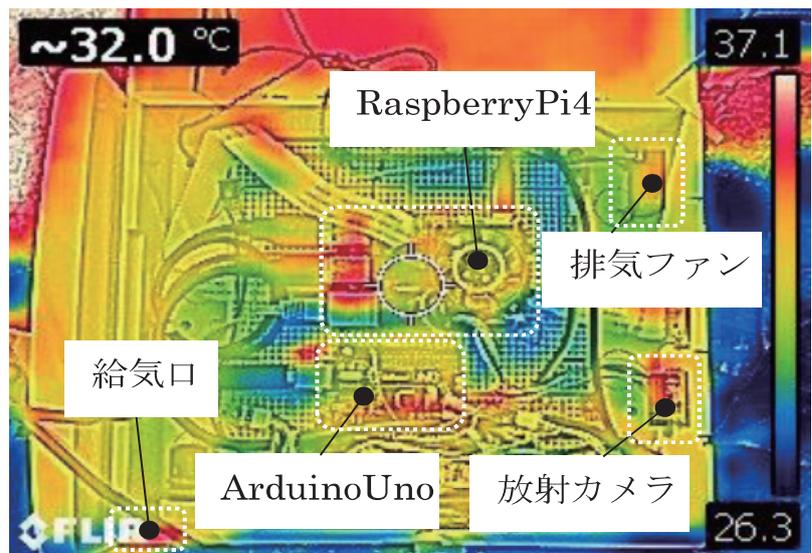


図6 装置稼働時のケース内の放射温度分布

計画するとともに、日射量計や二酸化炭素濃度センサに関しては、較正作業を実施し、妥当な絶対値の取得を目指す。

計測データから、計測装置内部に熱が籠っている可能性が示唆されたため、稼働中の計測装置内の熱分布を確認した。10月28日15:00にハンディタイプの放射温度カメラ（FLIR社製C2）を用いて、計装装置の上蓋を一時的に開けて、上部から計装装置全体を撮像した（図6）。装置内における風の流れは、左下部の給気口からと、中央右側のRaspberryPiに設置されているCPUクーラーからRaspberryPi周辺へ流れており、最終的に右上部の排気ファンへと向かっていると考えられる。CPU近傍の温度は27℃程度であるが、風の流れが弱い部分では、30~34℃程度の温度となっている部分を確認できる。具体的には、RaspberryPiのUSBポート、Arduinoや放射温度カメラ周辺である。

今回発生したエラーは、取得されたデータ期間の違いから、Arduinoで最初に発生し、その後、RaspberryPi、熱画像カメラ、可視画像カメラの順に連鎖していったと考えられる。また、計測装置内部の温度分布の検討から、Arduinoの設置領域が熱を持ちやすいことが確認できた。Arduinoの動作温度上限は60℃であり、RaspberryPiの動作温度上限の80℃よりも20℃以上小さい。各種センサと接続しているArduinoがRaspberryPiからの排熱の影響により動作不良に陥り、Arduinoの動作不良がさらにRaspberryPiの動作にも影響を与えた可能性が高い。

また、放射カメラモジュールは、温度較正用サーミスタからの発熱とラズパイからの排熱により30℃付近の値を示している。放射カメラモジュールの動作温度上限は80℃であるが、高温によるモジュール動作停止の可能性や放射温度カメラへのノイズ源となりうることから、温度較正用サーミスタへの換気やモジュール設置位置を検討する必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、園芸施設用環境計測装置の開発を行い、動作確認試験としてピーマン園芸施設に設置し、計測を行った。センサと2種類のカメラにより、妥当なデータが取得できており、より長期間のデータ取得を目指す。一方、装置データ取得が途中で止まったエラーに関しては、装置内の排熱処理などの問題から、センサ通信用Arduinoが動作停止し、放射カメラモジュールやRaspberryPiの停止へ発展した可能性が高いことが分かった。

今後は、装置内の排熱経路を確保するため、各装置の配置や装置内へのファンの追加などを検討する。また、Arduinoによるセンサ制御をRaspberryPiへ引き渡すなど、センサ通信をRaspberryPiに一元化することを検討する。RaspberryPiに関しては、CPUコア毎のログ解析を行うなど、処理負荷の分析・管理を行えるようにする。

## 謝 辞

園芸施設の利用や測定に関して、ピーマン園芸農家・松本政治様に多大なご協力やご助言をいただきましたことを感謝いたします。また、本研究は電気通信普及財団の研究調査助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) エペ・フーヴェリンク、タイス・キールケルス、オランダ最新研究環境制御のための植物生理（中野明正・池田英男監訳）、農山漁村文化協会、2017
- 2) 中野明正、安東赫、栗原弘樹、ICT農業の環境制御システム製作：自分でできる「ハウスの見える化」、誠文堂新光社、2018
- 3) 農林水産省、スマート農業、<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/>、閲覧2020年10月26日
- 4) 安場健一郎、星岳彦、金子壮、東出忠桐、大森弘美、中野明正：オープンソースハードウェアを利用した環境計測ノードの構築、農業情報研究、22(4)、pp.247-255、2013
- 5) 戸板裕康、小林一晴：教育用汎用基板Raspberry Piによる自律分散環境計測制御システム用オープンプラットフォーム（UECS-Pi）の構築、農業情報研究、25(1)、pp.1-11、2016
- 6) 高田拓、上田久生我、木村竜士、中山信、上田真也：可視・熱画像データ解析による植物生長に関する特徴量抽出手法の検討、高知工業高等専門学校学術紀要、66、pp.57-65、2021

受理日：2020年11月2日