

園芸施設における環境計測装置と連携する移動式ディフューザによる局所環境制御の検証

代表研究者	木村 竜 士	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
共同研究者	中山 信	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
	高田 拓	東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 准教授

1 はじめに

近年の施設園芸農業において、植物を取り巻く環境情報を自動収集し、それに基づいて環境制御することにより、植物の生長を管理し、作物の高収穫・高品質化に繋げようとする取り組みが多く見られるようになった。しかし、実際の環境制御は、気象や土壌、植生状態など様々な要因により施設内環境にムラが生じているにもかかわらず、施設全体に対して同一の運転条件で換気や空調が行われている。施設内の不特定の箇所で、果実表面への結露発生や生長具合のバラツキが発生することがあり、農家が手動で環境制御装置の発停を行っている実情がある。今後の園芸農業で安定的に高品質な作物を収穫するために、施設内の環境をより高次に制御する必要がある。そのためには施設全体の環境分布を把握するための計測技術と環境ムラの箇所を部分的に改善するための局所環境制御技術が要求課題となることが予想される。一方、農家が環境分布を把握するための多点計測とその環境情報を利用した環境制御を行うためには、大量の計測機器とその計測機器と連携できる専用の換気設備・空調設備、およびそれらの装置を運用するためのソフトウェアを含むシステムとして購入する必要がある、農家の経済的負担は計り知れない。

また、近年の IoT 機器の急速な普及に伴い、無線通信モジュールが安価で入手しやすい状況にある。その中で低消費電力かつ多点同時通信が可能な非商用無線である BLE (Bluetooth Low Energy) や Zigbee 通信モジュールが発展してきており、1 回あたりのデータ転送量が少なく、多点計測する場合に利用しやすい通信手段として注目されている。

筆者らは、これまで高知県内の農家と共に園芸施設の計測装置の開発 (図 1) および環境計測の研究に取り組んできた [1]。その中で、農家の「暖房時のオーバーシュートが原因で起こる一部の結露を防止するため、早朝時に自身の経験を頼りに手動で施設全体の空調機器の発停をかけている」という現状がある (図 2)。時々刻々と変化する気象条件に応じて早朝時に環境制御の運転条件を変更することは農家にとって大きな負担であるため、「計測装置からのデータに基づいて、必要な個所に必要なエネルギーだけを利用した環境制御をしたい」という声がある。全体の環境を把握するためには、多数の計測装置を設置し、計測装置と制御装置が適切に連携するシステムの構築が必要となり、経済的にも技術的にも困難な課題が多い。

そこで本研究では、多点計測用の IoT 環境計測装置と加湿機能付きディフューザを用いた局所環境制御システムを開発し、屋内小型ビニールハウスおよび園芸施設内での実証実験を通じて、実際の運用に必要な課題の抽出を目的とした。具体的には、以下の 2 項目について、研究を実施した。

- (1) 環境計測装置の開発と計測データを用いた植物の温度・湿度ムラの把握
- (2) 園芸施設における環境制御システムの構築に必要なデータの収集・分析



図 1 環境計測装置

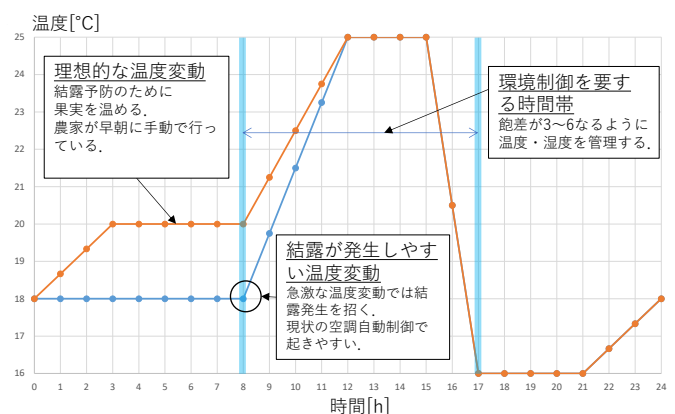


図 2 園芸施設内温度管理の理想と現状

2 環境計測装置の開発と計測データを用いた植物の温度・湿度ムラの把握

2-1 実験の概要

実験の概要を図3、使用機器を表1、測定項目を表2に示す。葉や果実の基本的な表面温度の変化を把握するための環境計測装置として、サーマルカメラモジュールを汎用型PCボードRaspberryPi4Bに組み込んだ熱画像撮影装置を開発した(図4)。その撮影装置により撮影された熱画像から分析対象となる葉や果実の画像データを迅速に抽出し、画像内の温度データのヒストグラムから熱分布特性が容易に把握できるツールを開発した。対象植物は、高知県の重要特産品であるピーマンとした。

日射量と風速によるピーマンの果実および葉の表面の温度変化の影響を確認することを目的とし、環境制御装置として、人工太陽灯、加湿機能付きディフューザを用いた。測定項目として、空気温度は、中野ら[2]の成果を参考に筆者らが自作した環境計測装置内に設置したT型熱電対、空気放射温度は、ベルノン式グローブ温度球(φ150mm)内に設置したT型熱電対、表面放射温度は、著者が自作した熱画像撮影装置をそれぞれ用いて測定した。測定間隔は、熱電対が1秒、熱画像撮影装置による熱画像撮影は、カメラモジュールのフレームレートとシステムの動作が比較的安定した60秒とした。なお、熱画像の解像度は、120×160画素である。測定期間は、2021年10月11日15:30-18:00である。測定場所は、高知工業高等専門学校専攻科棟1階木村研究室にある小型ビニールハウス(3.3㎡)で行った。

測定条件を表5に示す。環境制御装置は、太陽光の波長帯の再現性が高い人工太陽灯(セリック社製)と通風を想定した加湿機能付きディフューザ(Dyson社製)を用いた。太陽灯の出力は、著者らが高知県安芸郡芸西村に所在するピーマン園芸施設で実測した2020年10月初旬の施設内日射量を参考に500W/㎡程度とした。

ディフューザによる気流速度は、植物生長を促進する1.2m/s程度とした[3]。なお、本実験では、蒸散効果による温度変化への影響を除外するため、加湿は行っていない。機器の発停は、人工太陽灯は30分間毎に発停を行った。ディフューザは、測定開始90分後に人工太陽灯とともに30分間動作させる。なお、発停の操作はすべて手動で行っており、研究室は、設定温度28℃で空調した。

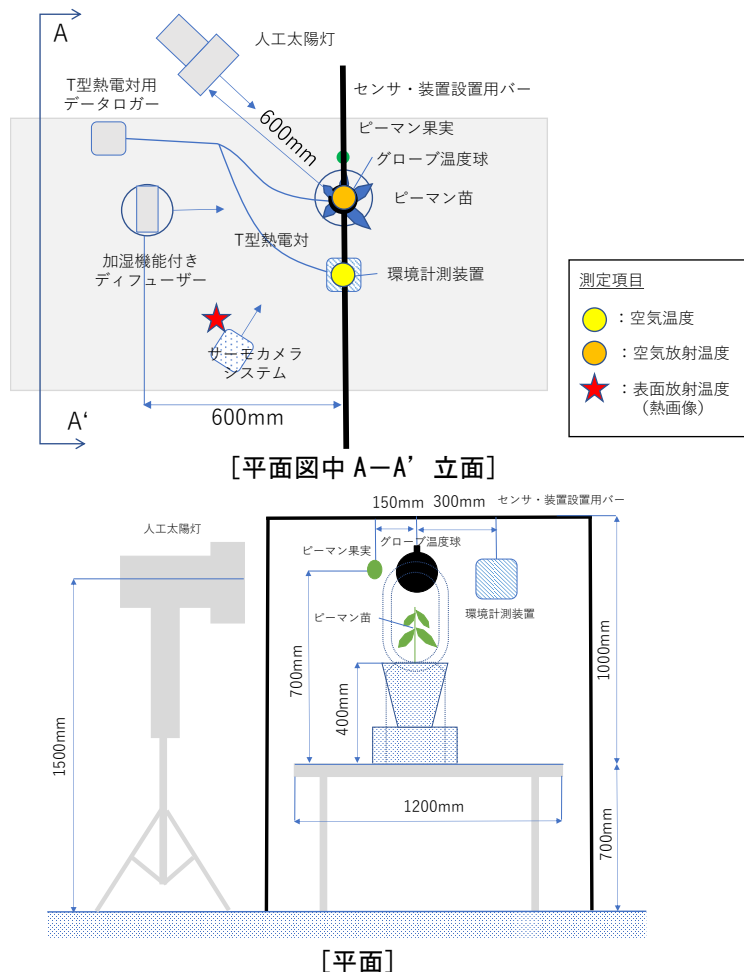


図3 実験装置・測定項目の概要

表1 機器の使用及び用途

使用機器	用途	製品名・メーカー他
加湿機能付きディフューザ	植物への送風 (1.2m/s)	PureHumidity+Cool・Dyson 社製 相対湿度: 最大 70%
人工太陽照明灯	植物への照射 (500W/㎡)	SOLAX500W XC-500B・セリック社製 放射波長領域: 300~780nm
グローブ温度球	空気放射温度の測定	ベルノン式 (φ150mm)・柴田科学社製
データロガー	T型熱電対通信・記録	GL-240・グラフテック社製
環境計測装置	空気温度の測定	著者自作
熱画像撮影装置	表面放射温度の測定	著者自作

表2 測定項目

測定項目	計測センサ	測定間隔 [秒]	備考
空気温度 [℃]	T型熱電 対	1	放射シールド内 通風
空気放射 温度 [℃]	T型熱電 対	1	グローブ温度球 (φ150 mm)
表面放射 温度 [℃]	サーマル カメラ Lepton3.5	60	解像度 (120×160 画素)

表3 測定条件

測定時間 [分]	人工太陽灯・発停	ディフューザ・ 発停
0 ~ 30	OFF	OFF
30 ~ 60	ON	OFF
60 ~ 90	OFF	OFF
90 ~ 120	ON	ON
120 ~ 150	OFF	OFF

2-2 空気温度および平均放射温度

グローブ温度から平均放射温度の算出を式(1)に示す。

$$MRT = t_g + 2.37\sqrt{V} (t_g - t_d) \cdots (1)$$

ここで、MRT:平均放射温度[℃]、 t_g :グローブ温度球温度[℃]、 t_d :空気温度[℃]、 V :気流[m/s]

空気温度および表面放射温度の変化を図4に示す。測定開始時の空気温度と空気放射温度は、ともに28℃程度であったが、開始30分後の人工太陽灯による放射熱の影響により、空気温度が28.8℃に対し、空気放射温度は、30.2℃と最大1.4℃程度大きい値を示した。次に、30分間人工太陽灯を消灯した後に再び人工太陽灯による照射とディフューザによる1.2m/sの気流の送風を30分間行った結果、空気温度は28.6℃に対し、空気放射温度は、29.1℃と最大0.5℃程度大きい値を示した。送風の有無で比較した場合、送風ありの温度差が送風なしの温度差と比べ、最大0.9℃程度小さい値を示したことから放射温度より低い室内温度の気流がグローブ球に送風されることでグローブ球の表面温度が低下したと考えられる。

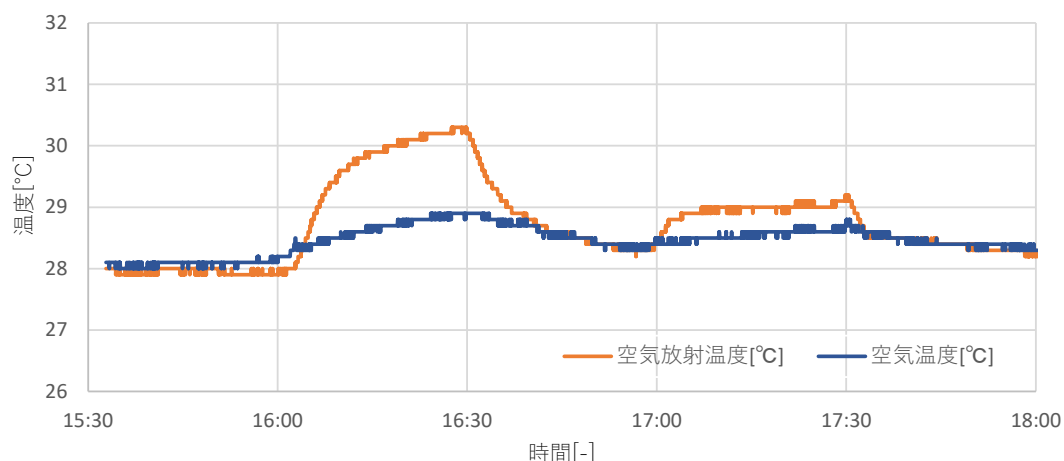


図4 空気温度および表面放射温度の変化

(1) 果実および葉の表面放射温度

サーマルカメラで撮影した熱画像の一例を表4に示す。熱画像は、256段階のグレースケールにより温度分布が表示されており、明度が高いに近いほど高温であることを示している。なお、今回使用したカメラモジュールは、視野角内の最小温度・最大温度から自動で256段階の色調が配色される。そのため、温度差の大きい画像かつ相対的な低温領域が大きい場合、画像全体が明度が低い画像となる(例えば、表4中の経過時間30分の熱画像など)。

経過時間30分後(人工太陽灯ON直後)の熱画像における果実と葉を比較した場合、葉が果実より高温であることを確認できることから葉のほうが放射熱の影響を受けやすいことがわかる。次に、経過時間60分後の熱画像から果実が葉と同様に高温部の占める領域が大きくなっていることから果実温度の上昇が確認でき

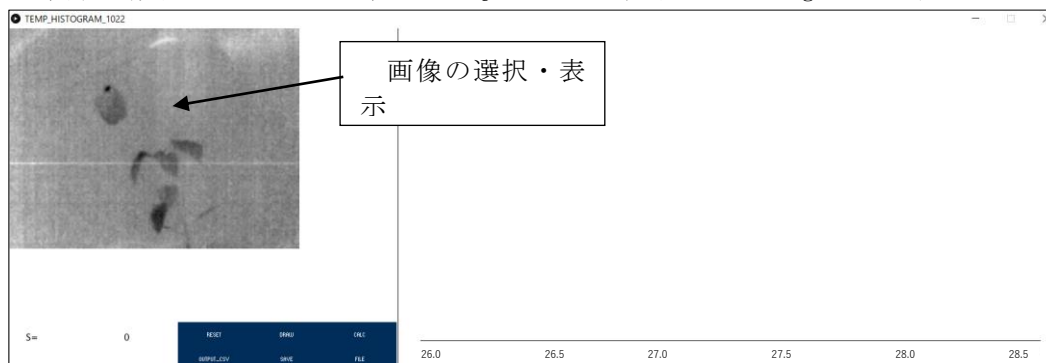
る．続けて、経過時間 65 分後（人工太陽灯 OFF 後、5 分経過）の熱画像において、葉の温度低下が確認できる一方、果実は葉よりも高温であることが確認できる．これは葉と果実の熱容量の違いによる影響と考えられ、より熱容量の大きい果実は、葉に比べ人工太陽灯による放射熱を蓄熱しているため、明度の高い領域が増加したと考えられる．経過時間 120 分後（人工太陽灯 ON・ディフューザ ON 後 30 分経過）の熱画像において、経過時間 60 分後（人工太陽灯 ON・ディフューザ OFF 後 30 分経過）と比較した場合、経過時間 120 分後の果実と葉が同程度の温度領域になっていることから、果実や葉の表面温度が送風により室内温度に近づくように温度が低下したと考えられる．

2-3 熱画像の解析

（１）解析ツールの概要

開発した熱画像解析ツールのプロトタイプモデルの画像処理実行前後の画面を図 5 に示す．ツールの基本的な機能として、①熱画像ファイルを読み込み、②画像内にある果実や葉などの解析対象物の縁をマウスクリックで選択し、処理実行ボタンを押す．③実行後は、選択した画像のみが表示され、④温度分布のヒストグラムが作成される．⑤そのヒストグラムから容易に温度の最小値、最大値および中央値が算出される．対象画像選択のアルゴリズムは、マウスポインタで選択された画像の座標値を読み取り、対象画像の領域を指定する．その後、対象画像の領域以外の画素データをすべて白色の RGB 値である (255, 255, 255) を入力することで対象画像のみ表示することができる．ヒストグラム作成アルゴリズムは、抽出された対象画像のグレースケールの画素データ (0~255) を読み取り、繰り返し構文で画素値別に積算する．その後、サーマルカメラモジュールから読み込める画像内最小温度（画素 RGB (0, 0, 0)）および最大温度（画素 RGB (255, 255, 255)）から割合を算出し、温度変換を行う．

また、その他の機能として、実行後の画像ファイルの保存やヒストグラムデータの CSV 形式での出力が可能である．なお開発は、Web アプリケーションとしての使用を想定しており、グラフィックユーザインターフェースに関する機能ライブラリが豊富にある JAVA ベース言語 Processing3 により行った．



〔解析処理の実行前（画像の選択）〕



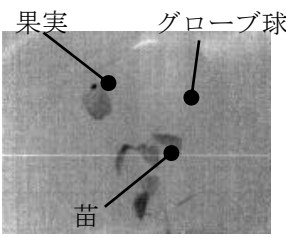
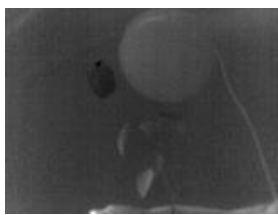
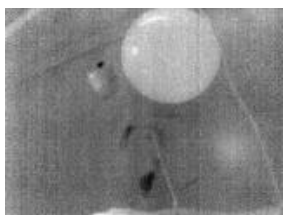
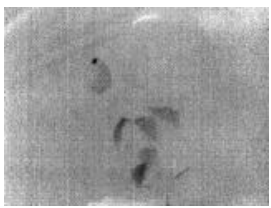
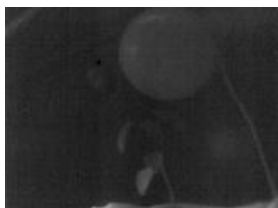
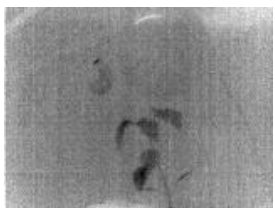
〔解析処理の実行後（ヒストグラムの表示）〕

図 5 熱画像解析ツール実行前後の画面

(2) 結果および考察

表4に示した8枚の熱画像にあるピーマン果実および葉の表面放射温度の中央値を開発したツールにより算出し、その変化を出力したグラフを図6に示す。葉の温度変化は、 26.5°C ～ 27.5°C であったことにに対し、果実の温度変化は、 26.5°C ～ 27.2°C とわずかに上限値が下回った。原因として、果実と葉の熱容量の違いが挙げられる。葉の急激な温度低下は、気孔の閉口による植物生長の阻害要因となり、かつ果実の急激な温度変動は表面結露による病原菌発生の要因となることから、葉や果実の熱容量を考慮しながら急激な温度低下を引き起こさない風量を明らかにする必要がある。結果の一例として、図7に表4中経過時間65分時の果実の表面放射温度を相対湿度90%の空間に入れた場合に発生する結露予測分布を示す。直接日射が当たらない、かつ表面の凹み箇所結露発生の可能性があることがわかった。

表4 ピーマンの果実および苗の熱画像の変化

経過時間 (分) : 0 (時刻 : 15 : 30) ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF	経過時間 (分) : 30 (時刻 : 16 : 00) ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 60 (時刻 : 16 : 30) ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 65 (時刻 : 16 : 35) ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF
			
経過時間 (分) : 90 (時刻 : 17 : 00) ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF	経過時間 (分) : 95 (時刻 : 17 : 05) ディフューザ : ON 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 120 (時刻 : 17 : 30) ディフューザ : ON 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 150 (時刻 : 18 : 00) ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF
			

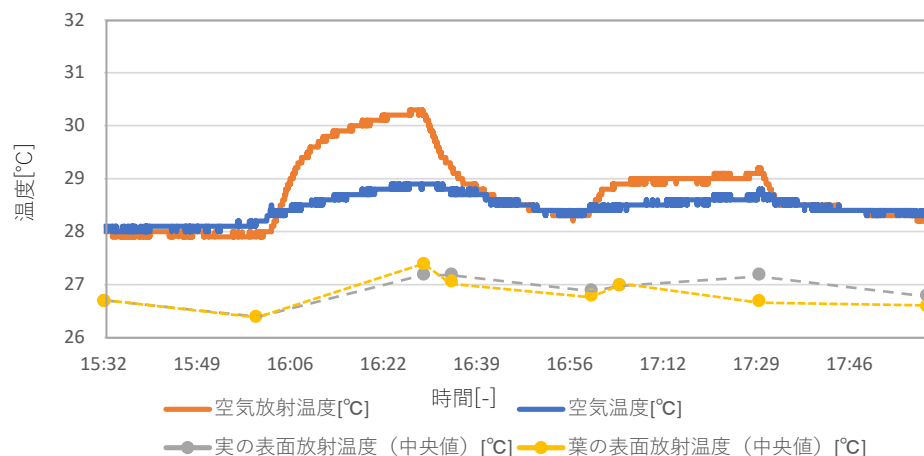


図6 果実および葉の温度（中央値）の変化

3 園芸施設における環境制御システムの構

築に必要なデータの収集・分析

3-1 園芸施設における環境制御の現状

高知県安芸郡芸西村にある園芸施設（図 8）において、環境制御装置の運用状況と環境計測データとの因果関係を明確にすることを目的に施設内の換気設備の窓開閉度を自作した自動撮影システムにより運用状況の画像データを収集した。

対象施設の取り扱っている品種はピーマンを扱っており、1050 m²に約 2000 株が定植されている。施設内環境制御設備は、灯油暖房機、給気ダクトファン、天井窓開閉装置を用いている。暖房の設定温度は、終日 18℃を下回らないように基本的には自動制御、温度変動の急激な変動に対応するために一部で運用している。天井窓開閉システムを図 9 に示す。窓開閉システムは図 9 で示した開度で施設内温度と連動して 4 段階で制御している（図 11）。本窓開閉システムも暖房制御と同様に急激な環境制御を要する場合は手動による強制開閉も可能である。

3-2 実測方法

施設内環境計測装置の配置を図 10 に示す。環境計測装置は著者らが開発したものである [1]。施設内外に環境計測装置を 1 点ずつとカメラシステムの計 3 点で計測を行った。著者は園芸施設内における環境計測装置をすでに開発しており、継続的に温湿度と二酸化炭素濃度の計測を行っている。施設内に設置した環境計測装置ではさらに土中温湿度と土壌水分量を測定した。天井窓開閉システムの動作確認のために web カメラ（解像度 200 万画素、BUFFALO 製）を用いたカメラシステムを製作し、10 分間隔で撮影を行った。園施設内環境計測装置の計測データは温湿度と二酸化炭素濃度、土中温湿度、土壌水分量を 1 分間隔で計測した。

測定期間は、2021 年 11 月 9 日～11 月 11 日とした。天候は快晴であった。この時期を選定した理由として、ピーマンの収穫時期であり、農家は施設内環境の制御に細心の注意を払いながら行っているため、農家にとって理想とする施設内環境データを収集することに適しているためである。

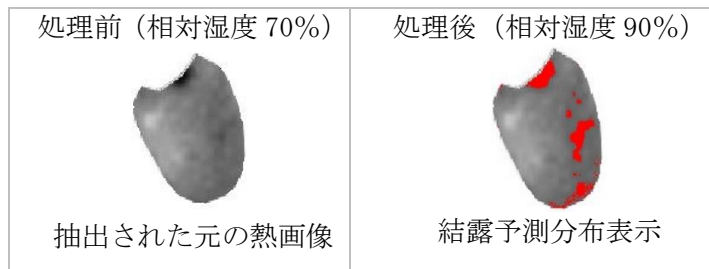


図 7 果実の結露予測分布表示の一例



図 8 園芸施設
(高知県安芸郡芸西村)

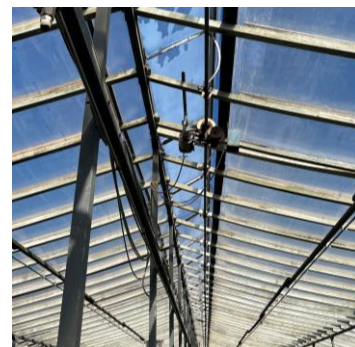
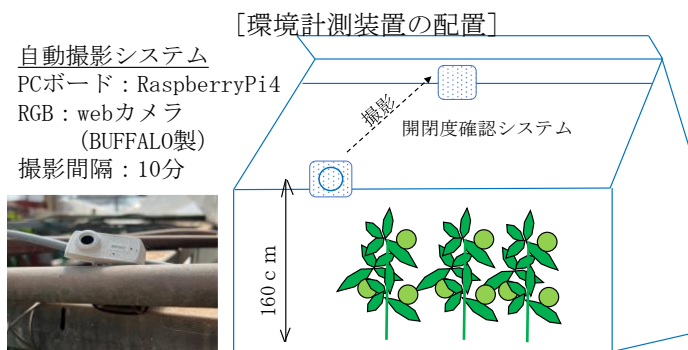
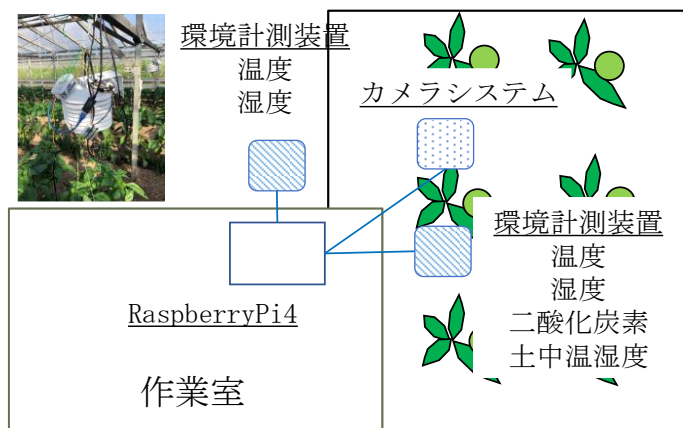


図 9 天井換気システム



[自動撮影システムの配置]

図 10 施設内の計測装置の配置

3-3 結果および考察

図 12 に施設内環境計測装置における温湿度と窓開閉度の計測結果を示す。窓開閉装置が開状態になる前の相対湿度において、約 95%であったのに対し、窓開放中の最小な相対湿度は 52%まで低下した。空気温度の変動は、窓開閉の換気より日射による影響が大きいと考えられる。このことから窓開閉システムによって施設内空気より乾燥した外気を取り込むことによって相対湿度は低下した一方、窓開閉による換気での施設内温度の低下は効果が低いことが分かった。

図 13 に二酸化炭素濃度と窓開閉度の計測結果を示す。窓開閉によって施設内の二酸化炭素濃度は大幅に減少し、ほぼ外気の二酸化炭素濃度と同様の値を示した。夜間では植物の呼吸の影響により二酸化炭素濃度は最大 1800ppm まで上昇し、窓開放による換気で、昼間は 400~500ppm の範囲で変化しており、二酸化炭素による植物の生長促進の効果は望めないことが分かった。

図 14 に施設内環境計測装置で計測した温湿度から求めた飽差値と窓開閉度の測定結果を示す。ピーマンの生長に効果的な飽差値の範囲は $3\text{g/m}^3 \sim 5\text{g/m}^3$ であるが、対象の園芸施設において、夜間は約 1g/m^3 、昼間は最大 12g/m^3 で変化していることが分かった。これは昼間は外気の入入れにより、施設内環境が植物にとって乾燥状態であること、夜間は植物の蒸散作用によって施設内が湿潤過多状態であることでいずれの環境も植物生長に適切な状態が少ないことが分かった。

4 おわりに

今回では施設内の環境制御の現状を把握するに当たり、環境計測装置の開発と計測データを用いた植物の温度・湿度ムラの把握および園芸施設における環境制御システムの構築に必要なデータの収集・分析を行った結果、以下の知見を得た。

- ・対象植物の熱画像と湿度データを基に画像処理することで果実表面における結露が発生しうる箇所を特定することができた。
- ・時系列で表面温度分布を計測することで葉と果実での結露発生時刻が異なることが示唆されたため、部位ごとの局所空調条件を精査する必要がある。
- ・窓開閉システムの開閉度を画像処理により定量化することで、施設内環境との因果関係を明らかにすることができた。
- ・対象施設の窓開閉システムによる飽差値を計測した結果、植物生長に効果的な運用がされていないことが分かった。

今後の展望として、自律走行型ディフューザの開発とそれを用いた環境制御を行うことで植物生長に効果的な制御条件を明らかにする。

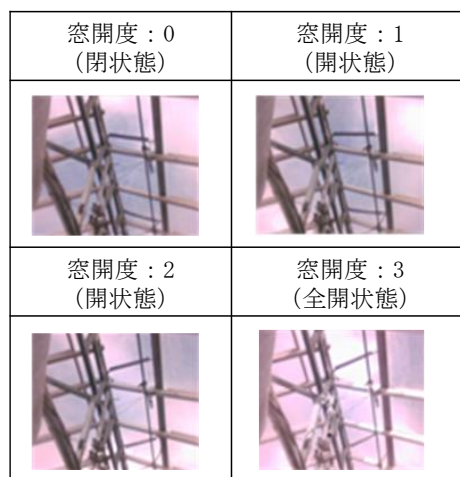


図 11 換気システムの窓開閉度

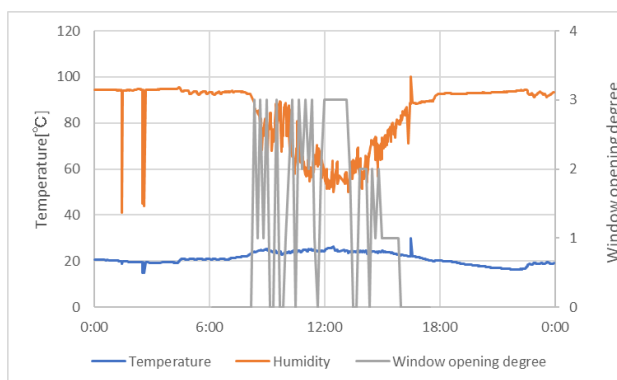


図 12 温度湿度と窓開閉度の変化

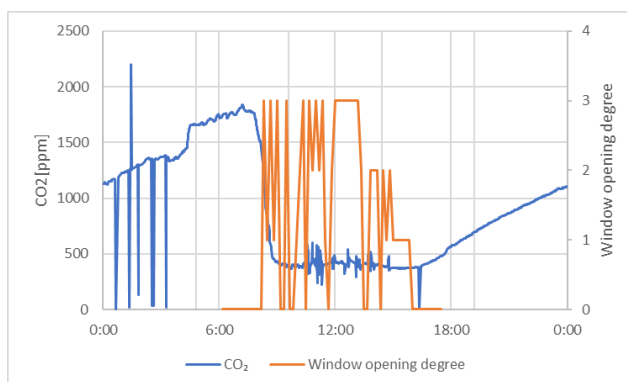


図 13 二酸化炭素濃度と窓開閉度の変化

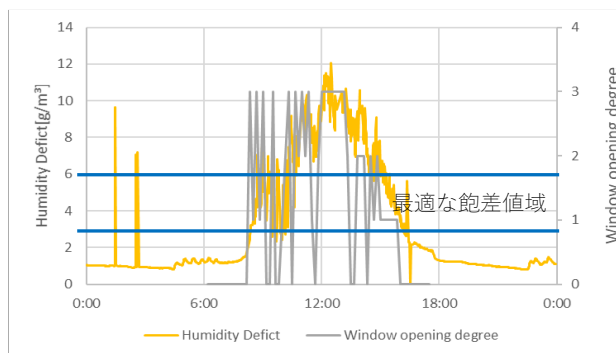


図 14 飽差値と窓開閉度の変化

【参考文献】

- [1] 木村竜士, 金村匡将, 中山信, 高田拓, 園芸施設内固定環境計測装置の開発と耐熱設計の検討, 高知高専学術紀要第 66 号, pp.37-44, 2020
- [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」, 誠文堂新光社出版, ISBN-10: 4416618719, p.151, 2018
- [3] エベ・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, p.96, 2017

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
園芸施設における移動式ディフューザによる局所環境制御	令和 3 年度 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会, 7-12, ○宮岡 奨一朗 (高知高専), 中山 信 (高知高専), 木村 竜士 (高知高専), 高田 拓 (東京都立産業技術高専)	2021 年 9 月
部分空間法によるハウス内環境制御モデルの設定回数とその妥当性	令和 3 年度 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会, 8-1, ○中脇 匠悟 (高知高専), 中山 信 (高知高専), 木村 竜士 (高知高専), 高田 拓 (都立産業技術高)	2021 年 9 月
学習条件が異なるモデルにおけるピーマン検出精度の比較	令和 3 年度 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会, 13-29, ○中島 優雅 (高知高専), 中山 信 (高知高専), 高田 拓 (産技高専), 木村 竜士 (高知高専)	2021 年 9 月
深層学習によるピーマン物体検出における YOLOv3 と YOLOv4 の比較	令和 3 年度 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会, 13-30, ○黄 崇鎮 (高知高専), 中山 信 (高知高専), 高田 拓 (東京都立産業技術高専), 木村 竜士 (高知高専)	2021 年 9 月
植物の時系列放射温度分布計測システムと放射温度画像解析ツールの開発	高知高専学術紀要第 67 号, 木村竜士・宮岡奨一朗・大内晴貴・中山信・大角理人・高田 拓, pp. 9-16	2022 年 3 月
モデル予測制御器を用いた窓開度によるビニールハウス内飽差気温制御: モデル化誤差の異なるモデルに対する検証	高知高専学術紀要第 67 号, 中山信・中脇匠悟・木村竜士・大角理人・高田 拓, pp. 25-34	2022 年 3 月
土耕栽培における水分重量監視装置の開発と実証試験	東京都立産業技術高等専門学校研究紀要 1, 6 鈴木 悠泰, 須原 廉, 星野 拓巳, 山崎 優太, 木村 竜士, 高田 拓, pp. 59-63	2022 年 3 月