

施設栽培用環境計測装置の開発とデータ取得状況： 2023 年ピーマンハウス栽培

Development of environmental measurement device for greenhouse and data acquisition status: green pepper cultivation in 2023

鈴木悠泰¹ 梅原伊吹² 稲尾哲哉² 中山 信³ 高田 拓²
Yuta SUZUKI Ibuki UMEHARA Tetsuya INAO Shin NAKAYAMA Taku TAKADA

要旨：施設栽培で利用できる環境計測装置の改良と計測を行った。環境計測装置は、ハウス外計測装置、ハウス内計測装置、土壌計測装置、撮像装置の4種類である。ピーマンの施設栽培において、気温、相対湿度、気圧、日射量、二酸化炭素濃度、土壌水分指標、土壌温湿度のデータ取得のために、長期間の計測実験を実施している。取得データには、季節に依存した特徴的な変化が捉えられており、植物の撮像画像から得られる特徴量との比較を行うことができる。さらに、環境計測装置の改良、台数の拡大などを行い、長期間の安定したデータ取得に取り組むことを目指す。

キーワード：施設栽培、環境計測、土壌水分量、ピーマン

1. はじめに

今までの農業では、土壌改良や灌水、収穫などの一連の作業において、農業従事者の長年の経験に基づいて、作業内容や作業手順が決められてきた。しかしながら、従来型の農業は労力や体力を相当必要とするため、若者や女性に敬遠され、後継者不足や人手不足という深刻な問題になっている。これらの問題を解決するため、近年では、栽培植物の収穫をより高品質で高収量とするため、様々なセンサや画像認識を利用したデータ管理を行う農業が注目されている。日本国内においては、データ監視に基づいた環境制御を目指しており、「ロボット技術や情報通信技術(ICT)を活用して、省力化・精密化や高品質生産を実現する等を推進している新たな農業」となるスマート農業化が進んでいる^[1]。農業分野におけるデジタル技術活用の現状に関しては、2020年農林業センサスによると、データを活用した農業を行っている農業経営体数の割合は約17%であり、データ活用の普及状況に課題がある^[2]。データ活用の17%の内訳は、「データの取得・分析して活用」が1.1%、「データを取得・記録して活用」が5.7%、「データを取得して活用」が10.1%である。取得したデータを長期間に渡って記録し、分析するなどの活用は十分でない。

当研究室では、ビニールハウス内の環境計測装置の開発、ピーマン栽培のビニールハウスへの設置、データ取得を行ってきた。具体的には、2022年9月から、ハウス内外の環境計測装置と土壌計測装置によりデータを取得しており^[3]、灌水状況の把握や光合成による二酸化炭素量の増減、日射量と温度の関係などを計測データから判断できるようになった。

本研究では、ピーマン栽培のビニールハウスに環境計測装置を設置し、長期間の安定的なデータ取得を目指してい

る。環境データとしては、気温、湿度、日射量、二酸化炭素濃度などの基本的なデータに加えて、土壌温湿度や土壌水分指標などを取得している。さらに、植物の撮像データを合わせることで植物成長に関する特徴量と環境データとの関係を理解することを目的としている。

2. 装置の開発

2.1. 計測装置の概要

開発した計測装置は、表1に示すように、ハウス外環境計測装置、ハウス内環境計測装置、土壌計測装置、撮像装置の4種類である。環境計測装置によりハウス内外の環境を計測し、土壌計測装置により土壌温湿度や土壌水分量の状態を計測する。撮像装置では、植物の成長をタイムラプス撮像する。

表1 計測装置の機能概要

装置名	計測パラメータ
ハウス外計測装置	気温・相対湿度・気圧・日射量・CO ₂ 濃度
ハウス内計測装置	気温・相対湿度・気圧・日射量・CO ₂ 濃度・可視画像
土壌計測装置	土壌温度・土壌相対湿度・土壌水分指標
撮像装置	タイムラプス画像

2.1.1. ハウス用計測装置

ハウス内及びハウス外に設置する環境計測装置では、気温、相対湿度、気圧、日射量、二酸化炭素濃度を測定する。ハウス内環境計測装置のシステム構成と外観を図2に示す。ハウス内外の環境を比較しやすいように、ハウス外環境計測装置は、センサ構成やサンプリング周期をハウス内環境計測装置とほぼ同じにしている。また、ハウス内外の気圧差を計測するため、計測装置の設置高さを揃えている。た

¹ 東京都立産業技術高等専門学校 専攻科創造工学専攻

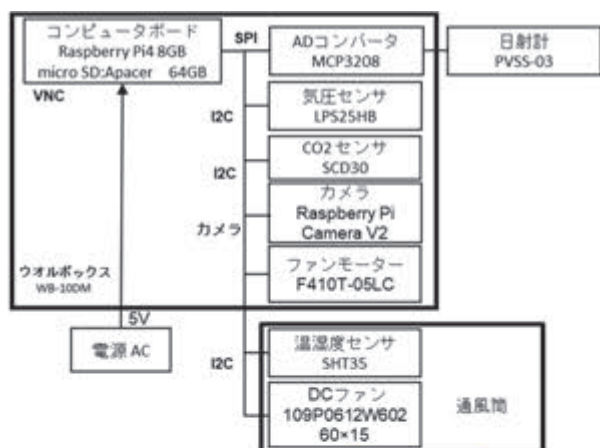
² 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

³ 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

だし、ハウス内環境計測装置には、植物の収穫量推定等の画像認識として用いるため、ラズパイカメラを搭載している。

日射計は装置ボックスの上部に、温湿度センサは、ファンによって常時送風する通風筒内部に設置している。また、装置内の熱源温度や装置内の温度を監視するため、コンピュータボードの CPU 温度、装置内の二酸化炭素濃度センサに含まれる温度センサを用いる。つまり、温度計測に関しては、SHT35 は通風筒内の気温、SCD30 は装置内温度、CPU 温度はコンピュータの熱源の温度の目安とする。データ取得のサンプリング周期は 10 秒とした。装置内の換気を行うため、ファンモーターを装置ボックスに設置する。2022 年シーズンに使用していたウオルボックス内のファンモーターを「F2510AL-05UCV」から「F410T-05LC」に変更することで、最大風量を 0.048 (m³/min)から 0.11 (m³/min)とした。

(a)



(b)

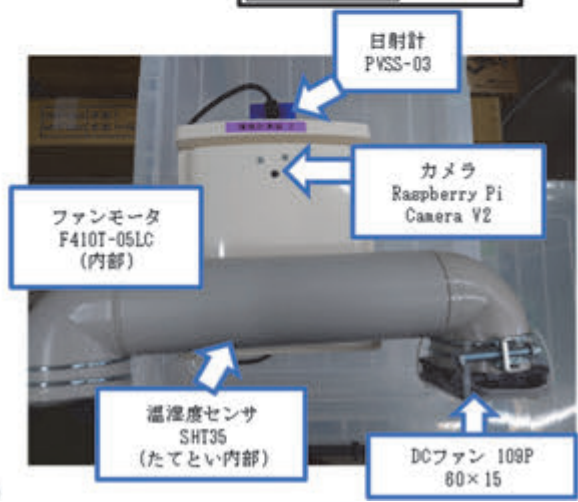
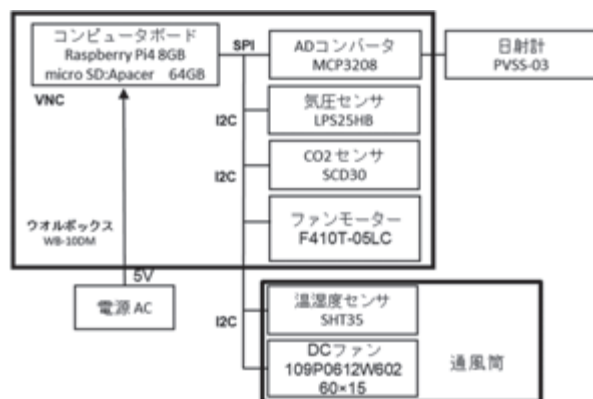


図 2. ハウス内環境計測装置の (a) システム構成と (b) 外観 (ハウス外環境計測装置は、カメラのみ搭載していない)

2.1.2. 土壌計測装置

(a)



(b)

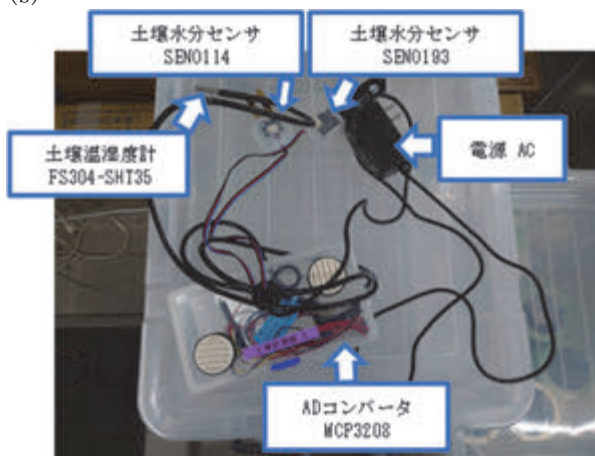


図 3. 土壌計測装置の (a) システム構成と (b) 外観

土壌計測装置では、土壌温湿度と土壌水分量を計測する。土壌計測装置のシステム構成と外観を図 3 に示す。使用した 2 つの土壌水分センサは静電容量式と電気抵抗式で、サンプリング周期は 10 秒とした。土壌水分センサの参考値を表 2 に示す。センサの基板部は、プラスチック容器で防水し、センサ部を土壌に差し込む。土壌水分センサにより、灌水のタイミングや土壌の状態を把握できる。なお、土壌計測装置はハウス外計測装置との設置高さの差が 1 m 以上あるため、センサへ長いケーブルを展ばさずに、低消費電力のコンピュータボードを地面に置くタイプの独立装置とした。

表 2 土壌水分センサの参考値

土壌の状態	SEN0193 (静電容量式)	SEN0114 (電気抵抗式)
乾燥している状態	430~520	000~300
湿っている状態	350~430	300~700
水中の状態	260~350	700~950

2.2. 撮像装置

撮像部として、市販品のタイムラプスカメラの設置と環境計測装置に搭載したカメラモジュールを用いて、60 秒

毎に植物全体の継続的な撮像を行った。カメラの性能比較を表3に示す。タイムラプスカメラにより、圃場の状況を把握することで、環境計測データの妥当性を検討することが可能である。

表3 カメラの性能比較

型番	Brinno BARD BAC3000	Raspberry Pi Camera V2
解像度	1920×1080	1920×1080
撮像間隔	1秒~24時間	
画角	118°	62.2×48.8°
撮像距離	20 cm~	焦点距離 3.04 mm
SDカード容量	最大 128 GB (SanDisk)	
カメラ保護	防水ハウジング ATH1000	装置ボックス POCKET CASE PC-210
固定アーム	ACC1000P	

2.3. データ取得システム

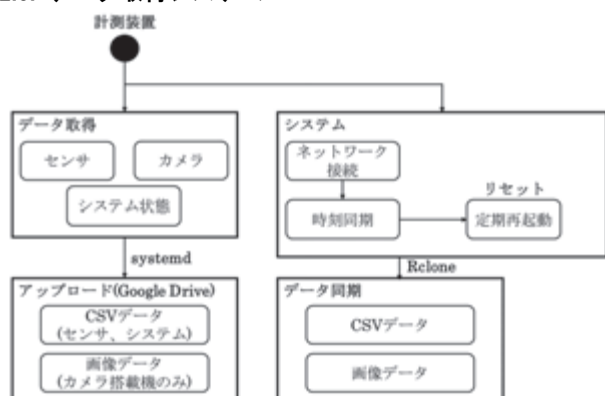


図4. データ取得システムの流れ

データ取得システムとしては、図4に示すように計測装置で取得したセンサデータを、コンピュータボード上のSDカードに書き込んだ上で、ネットワーク経由でクラウド上にアップロードする。コンピュータボードの状態を監視するため、CPU温度、CPU使用率、CPU動作周波数、SDカードのデータ使用量をCSV形式で記録している。

Raspberry Piを使用した装置では、コマンドのスケジューリングに、OSのシステム管理ができるsystemdを用いて制御できる。圃場で取得したデータは、1時間毎に当日分のデータファイルとしてアップロードし、アップロード

には、クラウドストレージへのファイルの転送や同期が可能なコマンドライン型プログラムのRcloneを使用した。ただし、インターネット接続や装置の状況によって、日を跨いでアップロードできなかった場合には、クラウド上にデータをアップロードできていない。また、計測装置を定期的にリセットするために、毎週月曜日の午前0時に撮像装置を除いた計測装置でOSの再起動を行っている。再起動に要する時間はRaspberry Pi 4が100秒程度、Raspberry Pi Zero 2 Wが40秒程度である。

また、圃場の装置に遠隔アクセスできるように、ネットワーク上の離れたコンピュータを遠隔操作するためのリモートデスクトップソフトVNC（Virtual Network Computing）を利用している。インターネットを介し、圃場に設置されたRaspberry Piのデスクトップ画面を研究室内のコンピュータで操作することが可能となる。使用するアプリケーションには、VNC Server（圃場側）及びVNCViewer（研究室側）を利用している。VNC Connectでは管理対象デバイス数はユーザー1人に対して5台と制限されている。また、2023年6月に1人当たり3台制限に変更されたため、すべての装置を操作できるように複数のアカウントを作成して対応した。

取得データの可視化に関しては、クラウドにアップロードされたデータを利用して、研究室側でグラフ作成して、グラフをクラウドにアップロードする。グラフ作成には、Pythonのグラフ描画ライブラリであるMatplotlibや、時系列データ群のグラフ化が容易なライブラリPlotlyを使用している。

3. 実証試験

高知県安芸郡芸西村にあるピーマン栽培のビニールハウスに、環境計測装置を設置して計測を行った。高知県でのハウスピーマン栽培は9月に苗の定植を行い、翌年の6月頃まで収穫を行う。今回は、2023年1月から6月までに取得したデータについて述べる。2023年1月から設置した第2期の環境計測装置は、ハウス外計測装置を2機、ハウス内計測装置を2機、土壌計測装置を2機とした。気圧に関してはハウス内外での環境計測装置を比較するため、ハウス外計測部は地面から120 cmの高さに、ハウス内環境計測装置は土壌分の高さ10 cmを含む地面から110 cmの高さに設置した。

各装置のデータ取得状況を図5に示す。装置を設置した前半の期間では動作不良によって計測装置が止まっていた。しかし、3月9日に圃場での装置の調整を行い、以降は、比較的安定的にデータを取得できた。

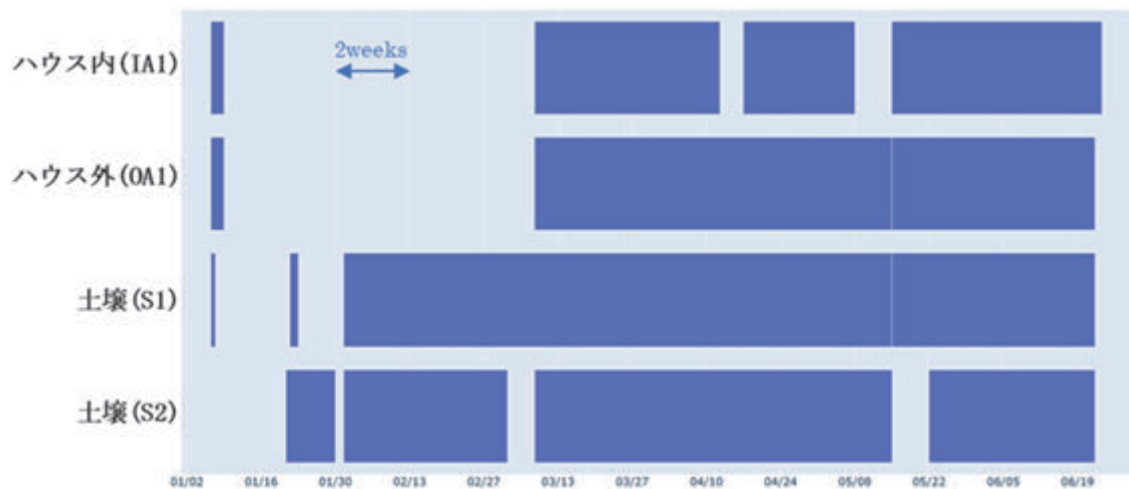


図5 各計測装置のデータ取得状況（2023年1月2日～2023年6月25日：青色はデータ取得期間）

3.1.3 月中のハウス内外の環境計測装置の計測結果

主な計測データの例を図6に示す。ハウス外計測部(OA1)では、ハウス外日射量は7:30頃から上昇し、12:00頃にピークを迎え、18:00頃にかけて減少している。日射量の増加に伴い、気温が上昇しており、相対湿度は気温上昇に伴って低下している。空気中の水蒸気量が一定であれば、気温が上昇すると飽和水蒸気量が多くなり相対湿度が下がる。一般に、農業分野では、相対湿度の代わりに、1m³の空気に後どの程度水蒸気を含むことが可能かを示す値である飽差を用いる⁽¹⁾。一般的に、飽差は6g/m³を超えると植物の防衛本能により気孔が閉じ、飽差が3g/m³を下回ると気孔が開いていても蒸散が行われなくなる。よって、日中の飽差の値を適切な範囲に維持することで、植物が成長しやすい環境を作ることができる。

ハウス内では日射により温められた空気が保たれるため、日中の気温が高く、相対湿度が低い。また、装置内温度は通風筒内の気温より高いが、コンピュータボードの発熱により温度が上昇しているためであり、図には示していないが、2023年3月16日のCPU温度は45～55℃程度であった。気圧は、ハウス内計測装置の方が常に高くなっているが、設置時に厳密な高さ調整をできなかったため、差圧の相対変化についてのみ議論する。日射量が増加する7時過ぎから、二酸化炭素濃度は減少し、16時30分頃に窓が閉まると徐々に増加する。

土壌装置1の土壌水分量に関しては、灌水のタイミングと考えられる時刻である8時頃、11時頃、13時30分頃に、2つの装置とも反応がある。ただし、灌水を行っていない5時頃や19時頃にも反応があるため、調査が必要で

ある。一方で、土壌装置2では、値が大きく変化しているが、灌水時刻と考えられるタイミングは明確でない。今後も、継続的に測定を行い調査する必要があると考えている。

3.2.5 月中の環境計測装置の計測結果

計測期間後半の5月のデータ例を図7に示す。2023年5月7日は、全てのセンサデータを取得できていた。5月の二酸化炭素濃度は最大3,000ppmであるが、3月は最大2,000ppmと大きく異なっていた。5月の方が、ピーマンが成長し、葉の量などが増えているためと考えている。5月の土壌水分量は、灌水などの反応がなかった。実際、4月19日までは灌水のタイミングを確認することができていたが、19日以降徐々にデータの反応が明確でなくなっているため、センサの劣化などが考えられる。

4. 計測データに対する考察

気象庁アメダスデータ（芸西観測所は圃場から北東に5km以内）との比較を行い、センサデータの妥当性を確認することができ、ある程度妥当な値を得ることができた。

センサデータに関しては、おおむね期待通りに取得できているが、ハウス内日射計などで正常なデータ取得ができていない場合がある。また、土壌水分量センサに関しては、継続して調査が必要である。ハウス内環境計測装置1機が動作不良のため、現状では1機体制での運用であった。今後、複数の観測装置を設置することにより、欠損データを抑えることに加え、圃場内の局所的な環境の状態を調べられると考えている。

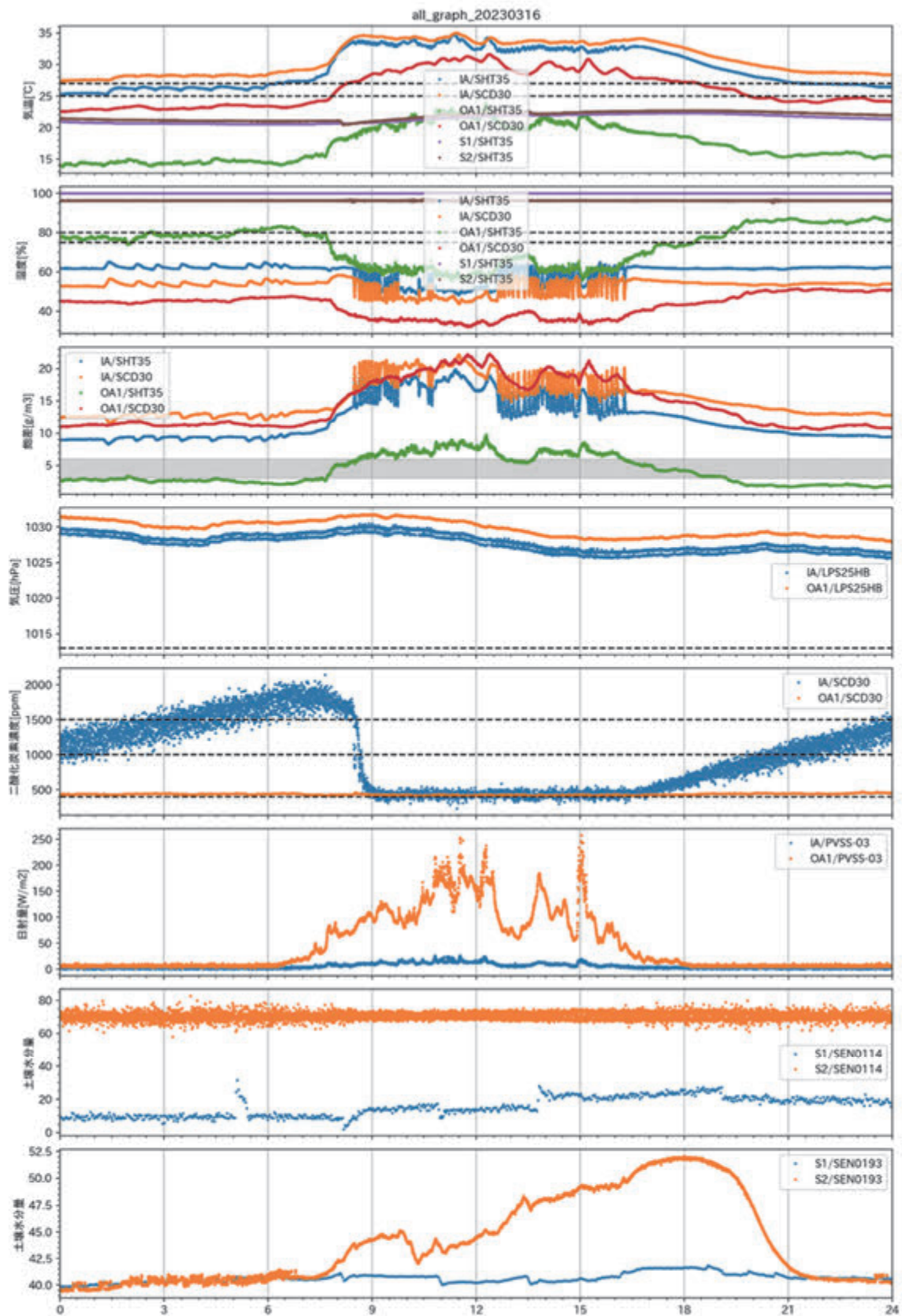


図 6. 各計測装置データの時系列変化
(2023 年 3 月 16 日 0:00~24:00)

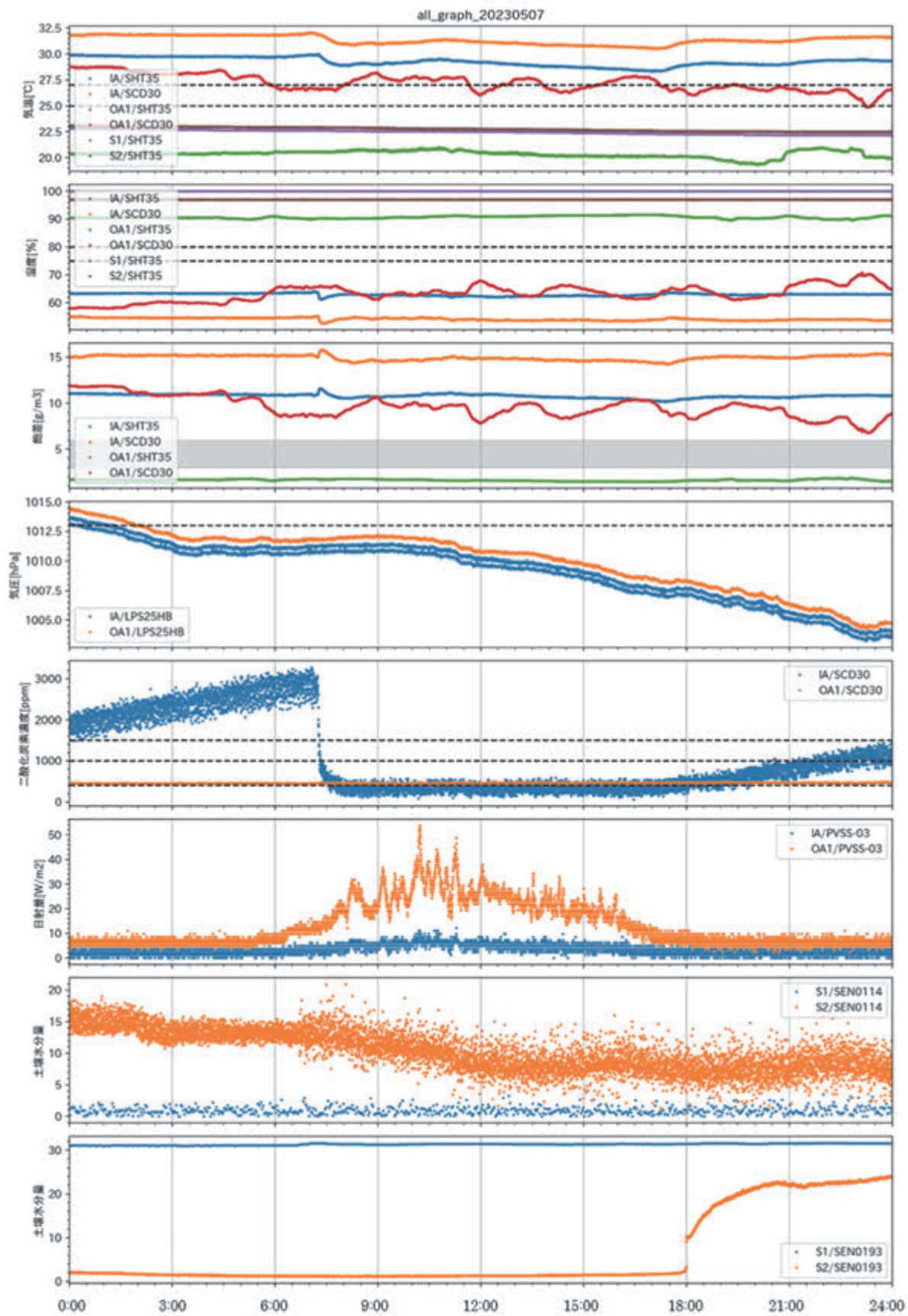


図 7. 各計測装置データの時系列変化
(2023 年 5 月 7 日 0:00~24:00)

5. まとめと今後の展望

施設栽培用の環境計測装置を開発し、長期間のデータ取得を行った。環境計測装置は、ハウス外環境計測装置、ハウス内環境計測装置、土壌計測装置からなる。2023年1月から6月までの間、気温、相対湿度、気圧、二酸化炭素濃度、日射量、土壌温湿度、土壌水分指標を計測した。今後は、さらに長期間データの取得をすることにより、季節や天候に対するハウス内環境の状態を把握する。農業分野では、環境データに加えて、植物成長に関係する様々な特徴量を取得することが求められており、植物画像からの特徴量抽出などを進める。将来的に、収量の把握をしながら、ハウス環境制御を行うのに十分な品質の長期間データの取得を目指す。

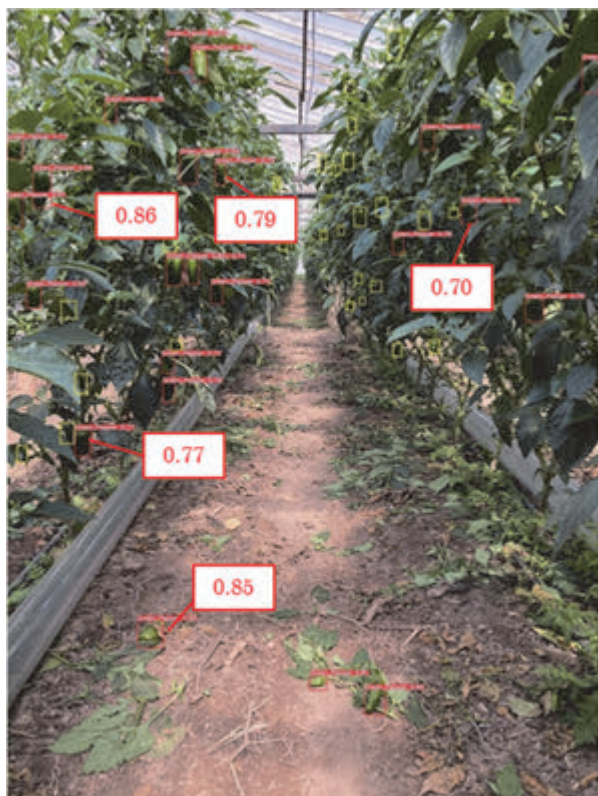


図 8. 検出された画像例

現在、植物画像の継続的な撮像を目指している。得られた植物画像から、植物生態に関する情報を抽出し、環境データとの比較を行うことが重要である。手法として、ハウスの通路方向を撮影した画像について、物体検出モデル YOLOv5 を用いてピーマンの検出をした。モデルから出力された検出例を図 8 に示す。画像中の赤枠はアルゴリズムで検出した果実で、ピーマンが存在する確率を示しており、黄枠はアルゴリズムで検出できなかった果実である。この例では誤検出はなく、検出率は 45% であった。主に検出できているのが撮影地点から近い果実であることも分かる。また、検出時の出力速度について、Raspberry Pi 4 では、

画像一枚当たり 4.16 秒を要した。ハウス内を自走装置で走査し撮影を行う場合、撮影間隔の調整をすることで十分動作し得ると考えている。連続して撮影地点を周回する場合、通路方向に沿って撮影地点を少しずつずらしながら撮影することを想定している。

謝辞

園芸施設への計測装置の設置に関して、ピーマン園芸農家の松本政治氏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。

参考文献

- [1] 農業情報学会編：新スマート農業—進化する農業情報利用—，農林統計出版，2019
- [2] 農林水産省，データを活用した農業経営の分析について，2020 年農林業センサス
- [3] 山崎優太，星野拓巳，鈴木悠泰，中山信，高田拓，施設栽培用環境計測装置の開発とデータ取得状況：ピーマンハウス栽培 2022 年シーズン，東京都立産業技術高等専門学校研究紀要，17，pp.87-95，2023
- [4] 木村竜士，金村匡将，中山信ほか：園芸施設内固定環境計測装置の開発と耐熱設計の検討，高知工業高等専門学校学術紀要，66，pp. 37-44，2021
- [5] 高田拓，上田久生我，木村竜士ほか：可視・熱画像データ解析による植物成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
- [6] 中山信，高田拓，木村竜士ほか：2 変数入力 of システム同定法によるビニールハウス内の温度・飽差モデル—春秋期におけるモデルの短期間学習と構築—，農業情報研究，30-1，pp. 1-12，2021