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

Development of environmental measurement device for greenhouse and data acquisition status: green pepper cultivation in 2022 season

山﨑優太[1]　星野拓巳[1]　鈴木悠泰[1]　中山 信[2]　高田 拓[1]
Yuta YAMAZAKI　Takumi HOSHINO　Yuta SUZUKI　Shin NAKAYAMA　Taku TAKADA

要旨：施設栽培で利用できる環境計測装置の開発を行った．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，土壌水分指標のデータ取得のために，長期間の計測実験を実施した．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，今後の植物生長制御のために利用できる．今後，環境計測装置の改良，増設などを行い，長期間の安定したデータ取得に取り組むことができる．

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

近年，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，「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おり，データ監視に基づいた環境制御を目指している [1]. ビニールハウスなどの施設栽培においては，天候などに影響されながらも，温度や湿度などの環境を調整する環境制御の実践が可能である[2,3]. そのため，植物生長に影響する環境情報を計測し[4-7]，植物生長に最適化させた環境制御を実践することで，生産性や品質を向上させることが求められている．

本研究では，ピーマン栽培のビニールハウスに設置する環境計測装置を開発し，長期間データを取得することを目指す．環境データとしては，気温，相対湿度，日射量，二酸化炭素濃度などの基本的なデータに加えて，土壌温度や土壌水分指標などを取得し，取得データから植物生長に影響する特徴量を抽出することを目標としている．

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．環境計測装置では，ハウス内外の環境を計測し，土壌計測装置では，土壌温湿度や水分量の状態を計測する．撮像装置では，植物の生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	計測量
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※1
土壌計測装置	土壌温度※1・土壌相対湿度※1・土壌水分指標
撮像装置	タイムラプス画像

※1 2023 年 1 月上旬実装

2.2. ハウス外計測装置について

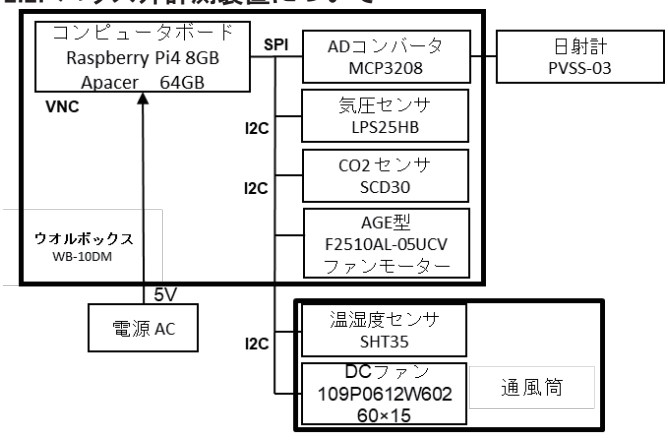

図 1　ハウス外環境計測装置のシステム構成図

[1] 東京都立産業技術高等専門学校　ものづくり工学科
[2] 高知工業高等専門学校　ソーシャルデザイン工学科

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．環境計測を行う各種センサやシステム構成を図 1 に示す．日射計は図 2 に示すように装置ボックスの上部に設置する．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する．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付属する温度センサを用いて計測を行う．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である．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．

また，気象庁のアメダスデータ（芸西観測所は圃場から北東に 5 km 以内）との比較を行うことで，センサデータの妥当性を確認することができ，局所的な環境変化の影響を把握できる．

2. 3. ハウス内環境計測装置について

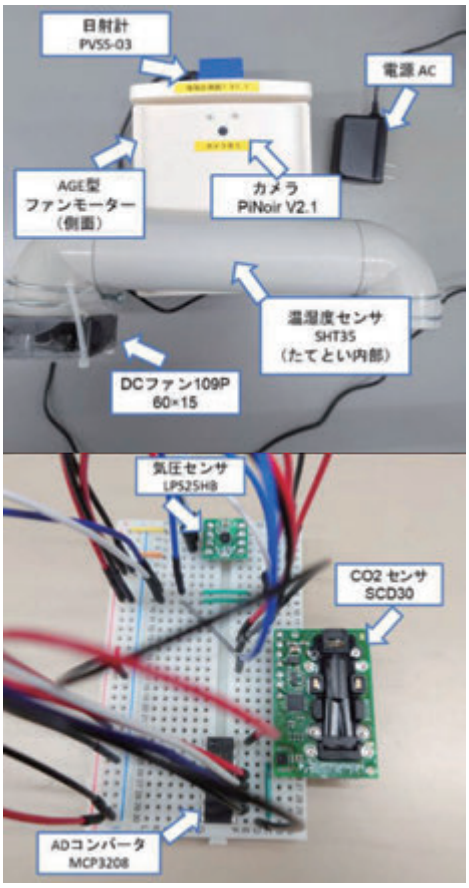

図 2　ハウス内環境計測装置の外観および内部

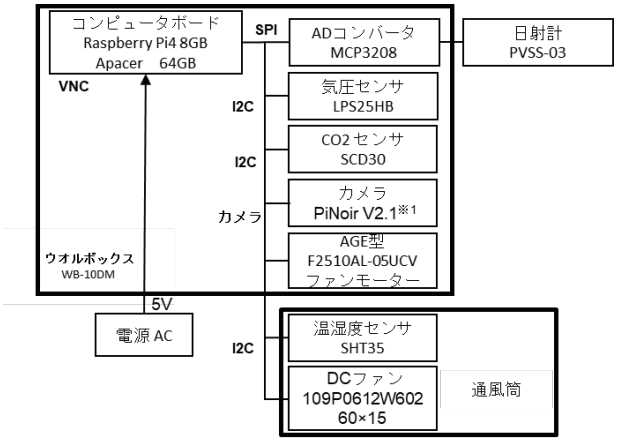

図 3　ハウス内環境計測装置のシステム構成図

ハウス内の環境計測装置のシステム構成を図 3 に示す．ハウス内外の環境を比較しやすいように，センサ構成やサンプリング周期はハウス外環境計測装置とほぼ同じにしてある．ただし，ハウス内の装置には，今後赤外線カメラを取り付ける予定である．計測装置の設置高さは，ハウス内外の気圧差を計測するため，ハウス外計測装置の設置高さに揃える．

2. 4. 土壌計測装置について

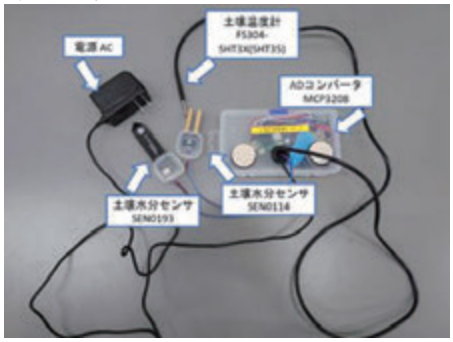

図 4　土壌計測装置の外観

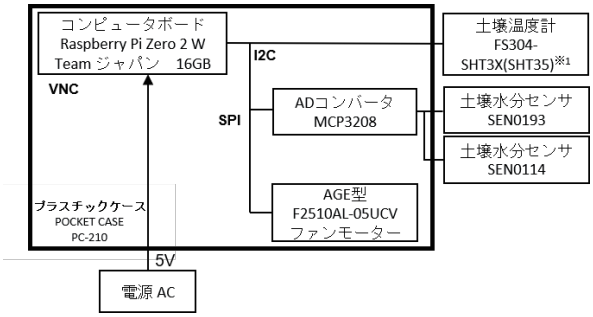

図 5　土壌計測装置のシステム構成図

土壌計測装置では，土壌温湿度と土壌水分指標を計測する．土壌計測装置のシステム構成を図 5 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 秒に設定した．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，潅水時刻や土壌の状態を把握できる．なお，土壌計測装置はハウス内計測装置との設置高さの差が 1 m 以上あるため，ケーブルを長くした 1 つの装置にせず，別個の低消費電力のコンピュータボードを利用した独立装置とした．

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

2.5. 撮像装置について

図 6　撮像装置の外観

撮像部として，市販品のタイムラプスカメラを設置し，60 秒毎に植物全体の継続的な撮像を行った. 使用したタイムラプスカメラを図 6 に，カメラの諸元を表 3 に示す．タイムラプスカメラにより，圃場の状況を監視することで，環境計測データの妥当性を検討することが可能である．実際に撮像した画像例を図 7 に示すが，時刻毎の日照の状況や植物の生長変化を確認できる．

表 3　タイムラプスカメラの諸元

型番	Brinno BARD BAC3000
解像度	1920×1080
撮像間隔	1 秒~24 時間
画角	118°
撮像距離	20 cm~
SD カード容量	最大 128 GB (SanDisk)

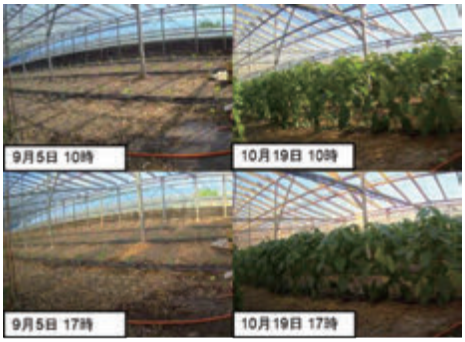

図 7　タイムラプスカメラによるハウス内の画像例

2.6. データ取得システムについて

データ取得システムとしては，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で 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 を用いて制御する．圃場で取得したデータは，1 時間ごとに当日分のデータファイルとしてアップロードする設定とし，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．

今後，設置する装置からは，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）を利用する。インターネットを介し，圃場に設置された Raspberry Pi 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）を予定している．

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，グラフ画像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 月に定植を行い，翌年の 6 月頃まで収穫を行う．今回の実証実験では 2022 年 9 月 1 日（タイムラプスカメラは 8 月 31 日から）に第 1 期の計測装置を設置し 12 月現在データを取得し続けている．また，2023 年 2 月上旬を目途に改良した第 2 期の環境計測装置と交換する予定である．

第 1 期の環境計測装置は，ハウス外計測装置を 2 機（内 1 機は予備），ハウス内計測装置を 2 機，土壌計測装置を 2 機とした．ただし，ハウス内環境計測装置の 1 機は，動作不良のため計測開始からデータ取得できなかった．気圧に関してはハウス内外での環境計測装置の比較を行うため，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．

各計測装置のデータ取得状況を図 8 に示す．装置を設置した前半の期間では台風の影響などがあり，長い間データ取得が止まっていた．また，後半の期間ではデータ取得が断続的になっており，長期計測によりコンピュータボードやセンサへの負荷が蓄積している可能性がある．今後，装置の回収後に，調査を行う．

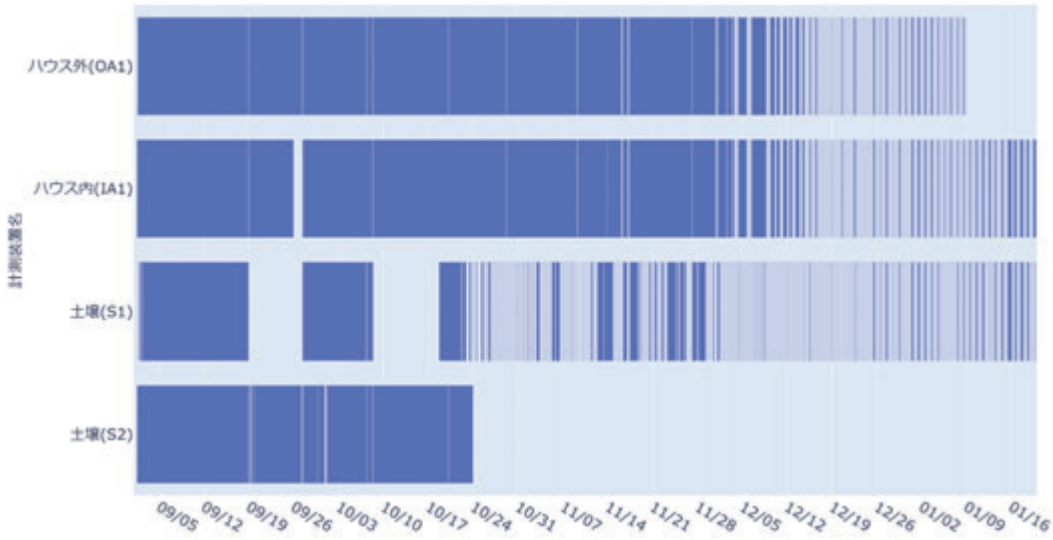

図 8　各計測装置のデータ取得状況（2022 年 9 月 1 日~2022 年 12 月 31 日：青色はデータ取得期間）

3.1. 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 9 に示す．ハウス外計測装置（OA1）では，ハウス外日射量は 6:00 頃から上昇し，13:00 頃にピークを迎え，18:00 頃にかけて減少している．ただし，ハウス内日射計は正常に計測できなかった．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，1m^3 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．飽差は，空気中の飽和水蒸気量と実際の飽和度の差で，以下のように算出する．

$$\text{飽和水蒸気圧[hPA]} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5\times\text{気温[℃]}}{(\text{気温[℃]}+237.3)}}$$

$$\text{飽和水蒸気量[g/m}^3\text{]} = \frac{217 \times \text{飽和水蒸気圧[hPA]}}{(\text{気温[℃]} + 273.5)}$$

$$\text{飽差[g/m}^3\text{]} = \text{飽和水蒸気量[g/m}^3\text{]} \times (100[\%] - \text{相対湿度[\%]})$$

一般的に，飽差は 6 g/m^3 を超えると植物の防衛本能により気孔が閉じ，飽差が 3 g/m^3 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，植物が生長しやすくなる環境を作ることができる．

ハウス内外の比較に関しては，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，通風筒内の気温よりは，装置内温度が高いが，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，2022 年 9 月 8 日

の CPU 温度は最低温度が 45℃程度で最高温度が 65℃程度であった．気圧に関しては，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．二酸化炭素濃度は，植物の呼吸の影響により，ハウス内計測装置の方が全体的に若干高くなっている．ただし，9 月はハウス内の窓を開けている時間帯が長いため，ハウス内の二酸化炭素濃度は，ハウス外の二酸化炭素濃度に比較的近くなっている．

今回計測しているハウスでは，積算日射が計 4000 J に達した場合，潅水候補時刻である 8:00 前，10:00 前，12:00 前，14:00 前に潅水を実施する．電気抵抗式の土壌水分センサ（SEN0114）では，水分量の増加により土壌水分指標が増加する．S1 では，緩やかな増加のみとなっているが，S2 では，潅水時刻 8:00，10:00，13:00 に土壌水分指標が増加しており，これは潅水によるものである．一方，静電容量式の水分センサ（SEN0193）は，水分量の増加により値が減少する．S1 では，8:00，10:00，13:00 での大きな指標の減少は潅水による．また，S1 では 19:00 頃に小さな減少が，S2 では，16:00 頃に増加が見られており，局所的な水分量の違いの可能性がある．また，両センサが示す指標は，水中状態にあることを示唆しているが，ピーマンハウスでは土壌がぬかるんだ状態となることもあり，許容範囲である．土壌水分センサに関しては，潅水などの大きな変化は捉えられているが，設置場所などによる変化の違いに関しては，継続測定による調査が必要である．

3.2. 給気ファン設置後の計測結果

装置を設置しているビニールハウスでは，2022 年 10 月 11 日から給気ファンとダクト内水スプレーにより飽差制御を始めた．給気ファンはハウス内気温が 25℃以上になると全開で回る．ダクトへの水スプレーに関しては，11 月まではハウス内飽差 4 g/m^3 以上で起動し，ハウス内飽差 3.8 g/m^3 以下で停止する．

給気ファンとダクト内水スプレーの運用後に取得したデータを図 10 に示す．ハウス外の飽差に差は見られないがハウス内部の飽差が小さくなり規定値に近づいている．また，ハウス内部の気圧が大きくなっており給気ファンが正常に稼働している．また，二酸化炭素濃度が夕方以降から大きく上昇しており，9 月 8 日では 500～550 ppm となっているが 11 月 6 日では 1,750 ppm と，3 倍以上数値が上昇している．9 月中の夜間は窓を開けているが，10 月から夜間の窓を閉めるようになったため，植物の呼吸による二酸化炭素がハウス外に排出されず二酸化炭素が蓄積されたためである．気温では，0:00 から 7:00 にかけて細かく上下しているが，これはハウス内に設置してあるボイラーの影響であり，20℃を下回ったときに稼働し，ハウス内の気温を 20℃以上に保っているためである．

4 計測データに対する考察

4.1 計測データの妥当性について

ビニールハウス内部は高温多湿な環境であり，電子機器を含んだ装置には，防水や熱対策などが必要である．計測した約 4 カ月半の装置の状態を確認するため，図 11 に計測している温度・湿度の変化を示す．装置内での熱源となる CPU 温度は、Raspberry Pi 4 で 40～70℃程度，Raspberry Pi Zero 2 W で 30～60℃程度であった．ハウス内では，温度が 20～40℃程度で，湿度が 50～90%程度であり，装置内では，温度が 30～55℃程度で，湿度が 25～60%程度であった．9 月期には，CPU 温度，装置内の温度ともに，かなり高温になるため，さらなる高温対策が必要である．

図 12 に装置内部の換気システムを示す．装置横からファンによる給気により，内部を正圧に保っているが，熱された空気は上昇する性質があり，ファンの取り付けを下側とする，ヒートシンクなどの冷却装置を付けるなどの対応を検討している．

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，ハウス内日射計と土壌水分量センサで正常なデータ取得ができていないため，装置の回収後に，原因を究明する．また，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る．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．

4.2　ハウス内外の気圧差について

ハウス内外の気圧差に関しては，給気ファンの起動時に変化することを確認できた．ハウス内の気圧に関しては，ハウス外気圧に比べて断続的に変化しており，風などの外的要因によるビニールの圧縮，膨張などが考えられる．図 13 に示すように，強い風を直に受けたハウスでは，ハウス内部を押す力がかかり正圧となる．一方，風下側では風の渦が発生し，ハウスが引っ張られ負圧がかかることがある．

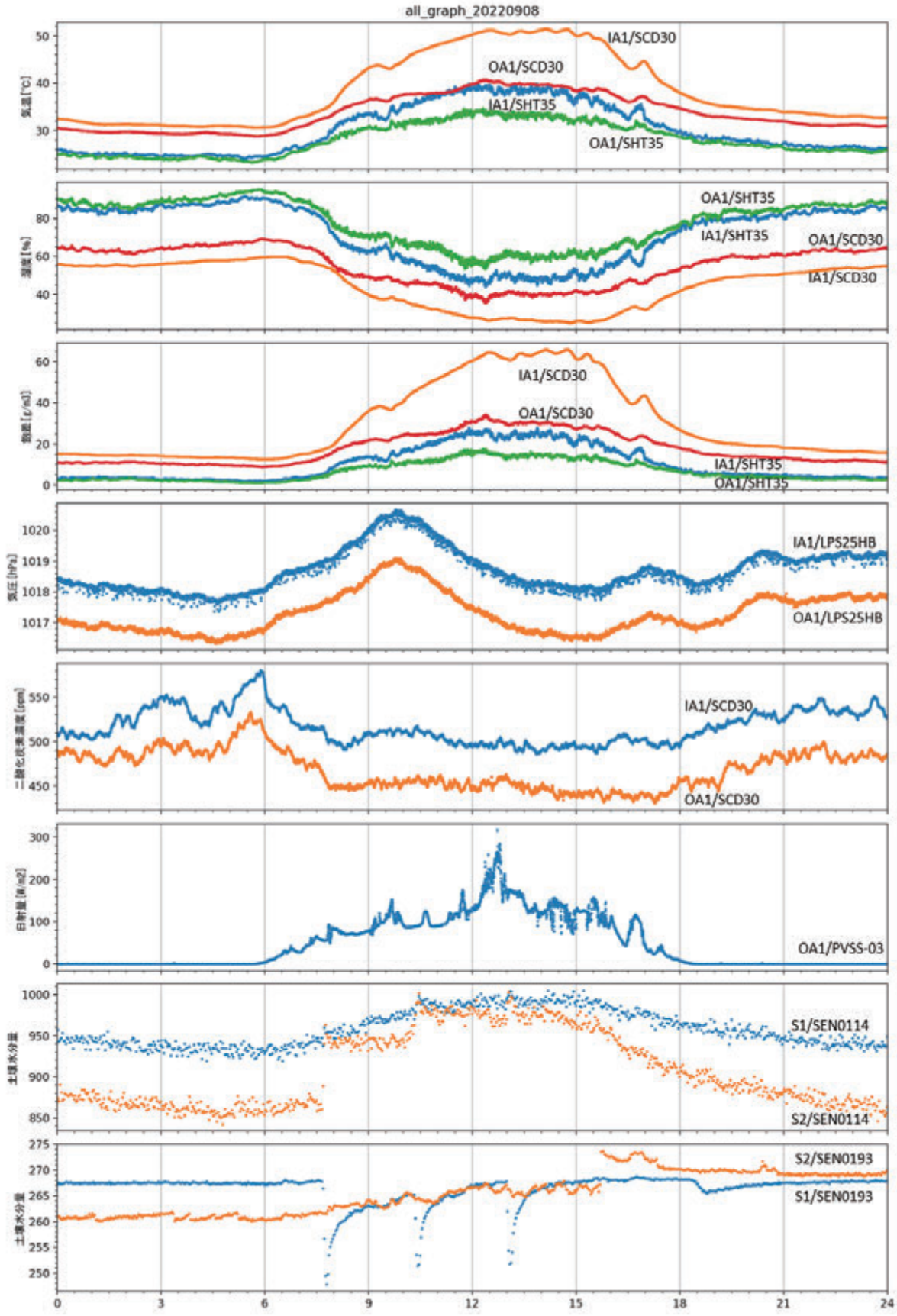

図 9　各計測装置データの時系列変化

（2022 年 9 月 8 日　0:00~24:00）

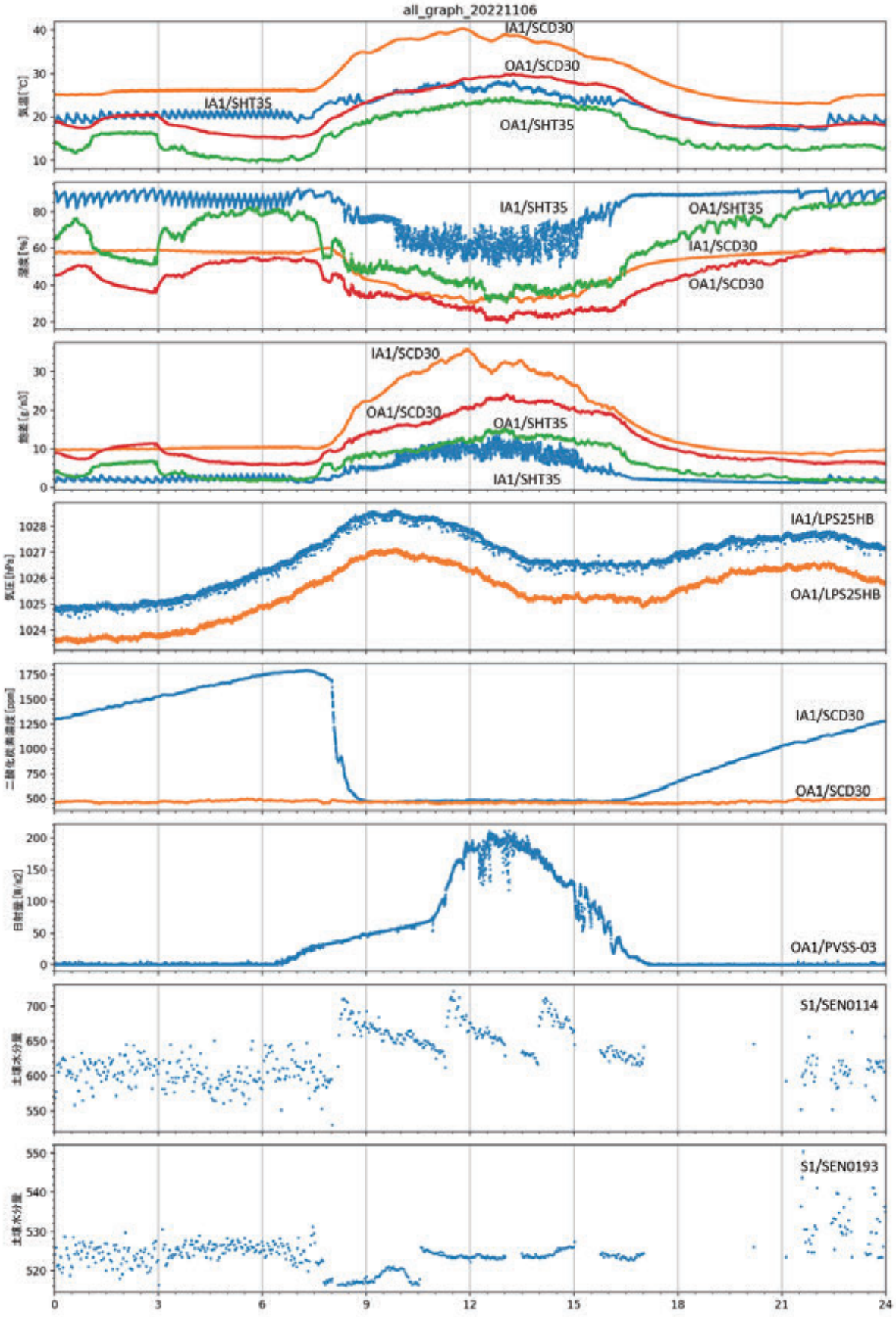

図 10　各計測装置データの時系列変化

（2022 年 11 月 6 日　0:00~24:00）

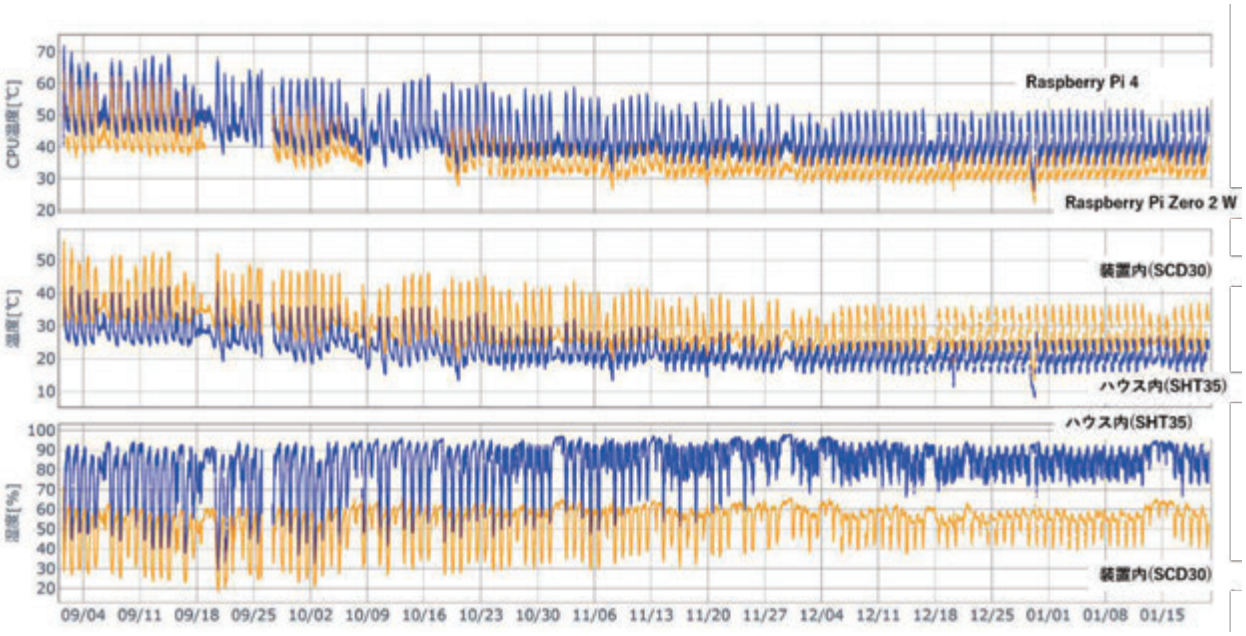

図 11　装置内各部での温度・湿度データ（9/1~1/22）

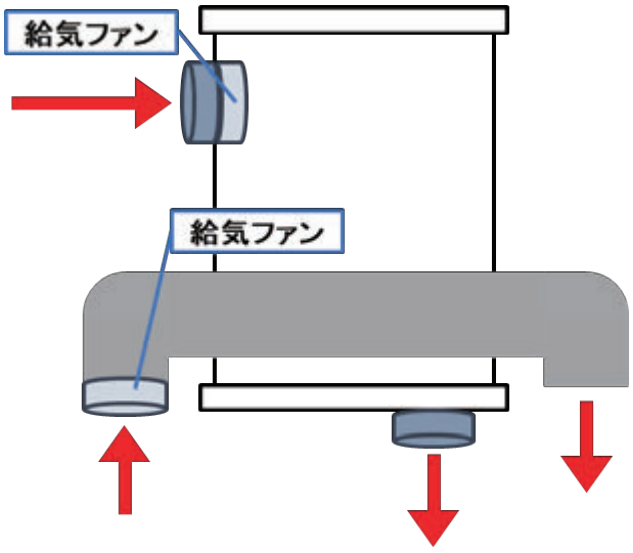

図 12　装置内の空気の流れ

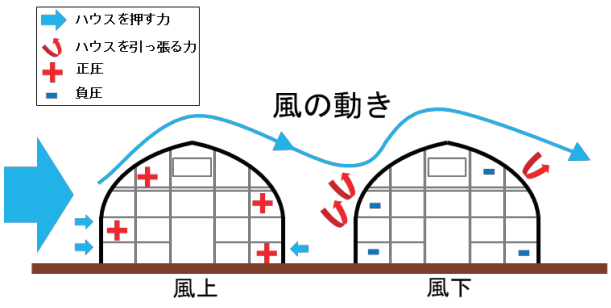

図 13　風によるハウスの気圧変化

5. まとめ

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．2022 年 9 月から 12 月までの間，気温，相対湿度，気圧，二酸化炭素濃度，日射量，土壌水分指標を計測した．一方で，短期的なデータ欠損は多くあり，より安定して稼働するようにプログラムの安定化や回路の再設計を行い，継続的なデータ取得を目指す必要がある．

今後は，さらに長期間のデータ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，植物生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．

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．

計測装置の開発に関して，一般財団法人 WNI 気象文化創造センターから助成を受けました．

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] 中山信，高田拓，木村竜士ほか： 2 変数入力の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

[3] 中山信，中脇匠悟，木村竜士ほか：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，高知工業高等専門学校学術紀要，67，pp. 25-34，2022

[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

[6] 木村竜士，宮岡奨一朗，大内晴貴ほか：植物の時系列な放射温度分布を把握するための熱画像解析ツールの開発，高知工業高等専門学校学術紀要，67，pp. 9-16，2022

[7] 鈴木悠泰，須原廉，星野拓巳ほか：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，16，pp. 59-63，2022