

# 太陽光型植物工場の VPD 分布解析のための多点センシング IoT システム Multiple Sensing IoT System for VPD Distribution Analysis in Plant Factory with Solar Light

佐伯 晃央<sup>1)</sup> 徳田 翔<sup>1)</sup> 岩田 大志<sup>1)</sup> 山口 賢一<sup>1)</sup>  
Akihiro Saeki Sho Tokuda Hiroshi Iwata Ken'ichi Yamaguchi

## 1 研究背景

異常気象や自然災害の深刻化、高年齢化が進む現代社会において、食の安心安全や農作物の安定した生産が求められている。その解決策として植物工場が注目されている。植物工場には太陽光を利用し半閉鎖環境で冷暖房や加湿、除湿等による環境制御を行う太陽光型と、完全な閉鎖空間で温湿度、CO<sub>2</sub> 濃度等の環境要素を制御する人工光型の 2 種類が存在する [1]。太陽光型では人工光型と比較して設備の導入や維持に要する費用が抑えられるという利点を持つ反面、時間や天気によって温度や湿度が細かく変わるためやや不安定であるという欠点が存在する。人工光型では環境要素を全て制御するため太陽光型と比較して安定した栽培が可能であるが、環境制御設備の導入や維持、運用のコストが大きくなる。

植物工場の湿度管理で近年注目されているのが「水蒸気飽差 (Vapor Pressure Deficit: VPD)」である [1]。調湿の指標としては相対湿度を用いることが多いが、同じ相対湿度でも温度が変わると空間の VPD が変化し植物へのストレスとなる。植物工場内部は均等な空間分布であるとは限らず、植物工場全体の高収量化を達成することや植物に限界のストレスを与えて甘くするなど、高付加価値化を目指すにはストレスを与えすぎることによる植物の全滅などリスクが高い。正確な成育環境の空間分布を明らかにし、その生育環境を制御に活用することで最終的にはさらなる高収量化・高付加価値化を目指す。

渡邊ら [2] は、VPD を一定に保つよう、細霧の噴霧量を連続的に調整可能なシステムを開発した。開発された VPD 制御システムを導入した実験区は、換気のみを行う対照区と比較して、夏期および冬期の栽培において 10~20%の収量が増加することを報告している。しかし、開発したシステムは環境計測を中央 1 点で行っていることから工場全体の環境変化に対応していない。そこで飛澤ら [3] は、IoT ゲートウェイを用いて太陽光型植物工場の VPD 制御における環境データの多点リアルタイム計測 IoT システムの構築を行った。生育環境の変化を推定することで植物の状態に合わせて適切に環境制御を行う手法が提案され、植物の成長を均一化できる可能性があることが報告された。

飛澤らの VPD 計測システムでは、図 1 のように植物工場全体を計測できるようセンサを配置して計測している。しかし、設置されたセンサは全て群落内に設置されているため群落間の正確な VPD 分布が明らかになっていない。群落の葉や茎の密集により空気の流れ方が異なるため、群落内と群落間、通路では VPD の分布が異なることが考えられる。本稿ではセンサを図 2 のように群落内と群落間に設置し、VPD を計測、分析できるシス

1) 奈良工業高等専門学校情報工学科. Department of Information Engineering, National Institute of Technology (KOSEN), Nara College.

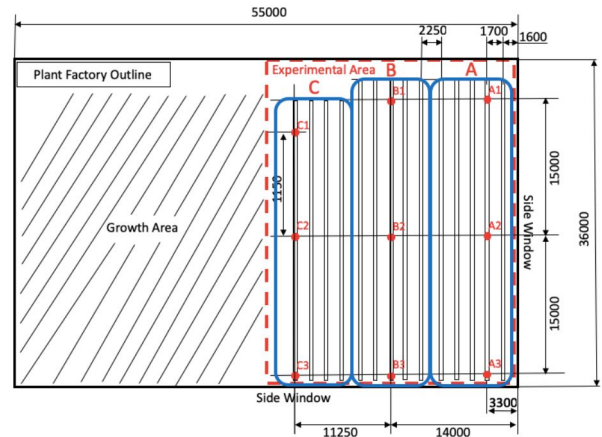


図 1 多点リアルタイム計測 IoT システム [3]

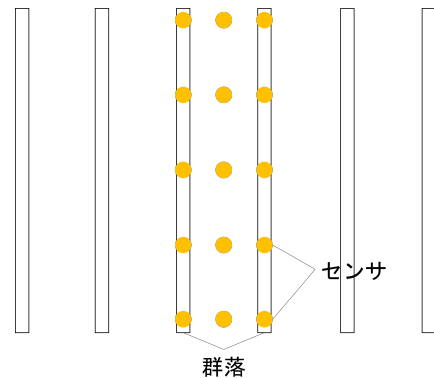


図 2 センサ設置図

テムを提案する。設置したセンサから正確な温湿度や VPD を計測することで、群落内と群落間、通路で VPD 分布の偏りを明らかにする。

## 2 VPD 分布解析システムの提案

### 2.1 VPD 算出方法

本稿では、温湿度センサノードから得た情報から VPD を算出するため、VPD を温度と相対湿度の関数として以下のように算出する。まず、JIS Z 8806[4] で用いられている Sonntag 式 (1) を用いて現在の温度  $T$  [°C] から飽和水蒸気圧 (Saturated Vapor Pressure: SVP) [Pa] を求める。

$$\begin{aligned} SVP(T) = & \exp(-6069.9385(273.15 + T) \times 10^{-1} \\ & + 21.2409642 \\ & - 2.711193(273.15 + T) \times 10^{-2} \\ & + 1.673952(273.15 + T)^2 \times 10^{-5} \\ & + 2.433502 \times \ln(273.15 + T)) \end{aligned} \quad (1)$$

さらに、現在の水蒸気圧 (Vapor Pressure: VP)[Pa] は温度 T[°C] と相対湿度 RH[%] から式 (2) で求められる。

$$VP(T, RH) = SVP(T) \times RH \times 10^{-2} \quad (2)$$

よって、水蒸気飽差 (Vapor Pressure Deficit: VPD)[kPa] は温度 T[°C] と相対湿度 RH[%] から式 (3) で求められる。

$$VPD(T, RH) = (SVP(T) - VP(T, RH)) \times 10^{-3} \quad (3)$$

## 2.2 VPD 分布解析システム

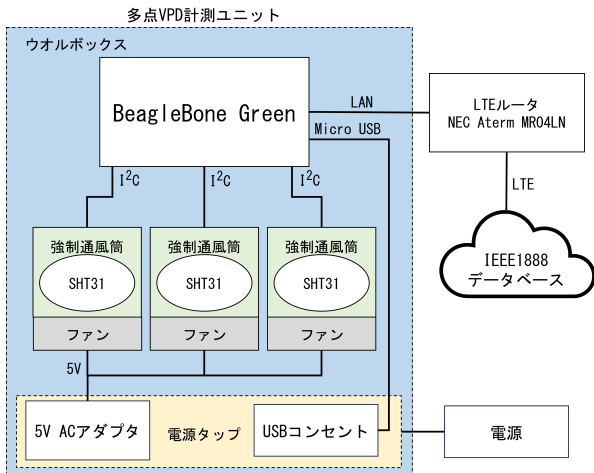


図 3 システム構成図

図 3 は提案するシステム構成図である。Debian 10 をインストールしたマイコンである SeedStudio 社製 BeagleBone Green と温湿度センサである SENSIRION 社製 SHT31 を用いて設計を行う。また正確な測定のためのセンサに対する通風を確保するために 5V ファンを用いる。提案システムでは、BeagleBone Green に SHT31 を I<sup>2</sup>C により接続し、温湿度の計測、VPD の計算を行う。その後温湿度と VPD をクラウド (IEEE 1888) にアップロードする。アップロードされたデータは数値とグラフとして確認することが可能である。

BeagleBone Green は Linux ディストリビューションのひとつである Debian がデフォルトの OS としてインストールされており、マイコン用のディスプレイなどの機器が必要なく、PC に USB ケーブルで接続することにより簡単に開発を行えることからコントローラとして用いた。植物工場での計測システムのコントローラとして主に Raspberry Pi, M2M Gateway が使用されている。しかし、Raspberry Pi には電源と SD カードに起因する動作の不安定性があり、M2M Gateway にはネットワーク通信チップの発熱と夏季の高温によりアップロードが停止する問題がある。BeagleBone Green は内部ストレージと低発熱なネットワーク通信チップが搭載されており、これらの問題を解決して使用することが可能である。

BeagleBone Green にある 2×46 の GPIO ピンヘッダには選択可能な 8 つのモードでピンマップがある。提案システムでは I<sup>2</sup>C のピンマップを利用し、1 台の

BeagleBone Green に対して 3 つの SHT31 を I<sup>2</sup>C で接続する。

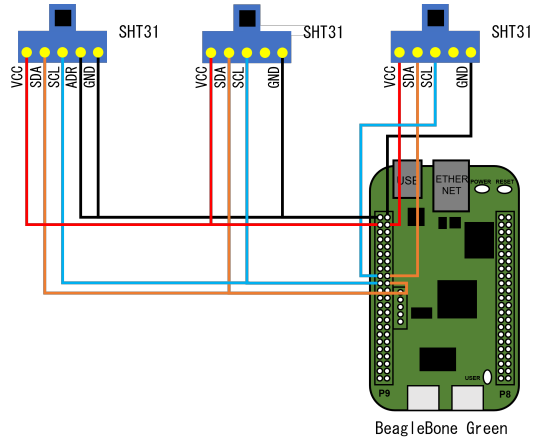


図 4 配線図

図 4 は提案システムの配線図である。2 つの SHT31 を BeagleBone Green の I2C1 ピンである P9.17, 18 に接続する。1 つを I2C2 ピンである P9.19, 20 に接続する。BeagleBone Green には I<sup>2</sup>C コネクタは 2 つしか搭載されていないが SHT31 は ADR ピンをグラウンドに接続することで I<sup>2</sup>C アドレスを変更することができる。そのため、1 台の BeagleBone Green に対して最大 4 つの SHT31 を接続することが可能である。

気象庁 [5] では正確な温度を計測する際にセンサを高さ 1.5m に設置し、常に 3m/s 以上の通風を確保して計測を行っている。提案システムではその方法に倣い、センサ部分に通風を確保できる小型の強制通風筒を作成する。強制通風筒は 3DCAD で設計し、3D プリンタで印刷して作成した。強制通風筒の 3 面図を図 5 に示す。

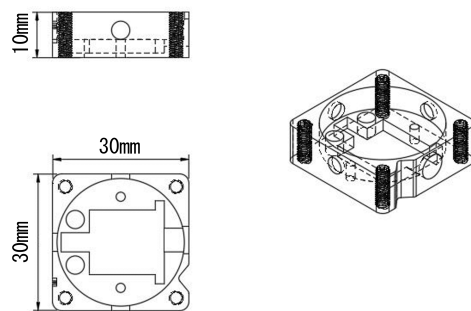


図 5 強制通風筒 3 面図

図 5 より、作成した強制通風筒は幅・奥行・高さが 30mm×30mm×10mm であり小型になるように設計した。上部にファンを付けることで側面の 3 面と底面の通風用の穴から外部の空気を吸い込むようになっている。またファンの風を直接センサに当ててしまうとファンのモーターの熱が計測に影響を及ぼす可能性があるため、ファンの向きは強制通風筒の外向きであり、風を外側に送り穴からの吸気のみがセンサに当たるようになってい

る。図 6 に強制通風筒の断面図を示す。また、図 7, 8 に強制通風筒の外部と内部を示す。

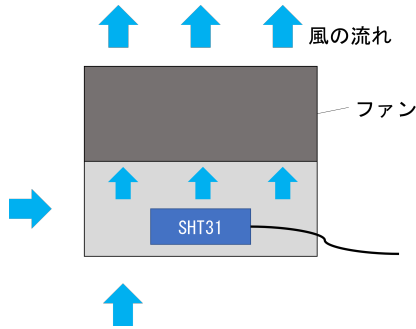


図 6 強制通風筒断面図

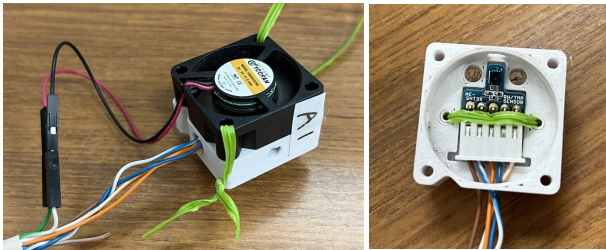


図 7 強制通風筒外部



図 8 強制通風筒内部

図 7, 8 より, SHT31 を内部で固定し, 5V のファンを動作させ空気が流れるようになっている。ファンを動かす際には, 外部電源として 5V の AC アダプタを使用した。

BeagleBone Green などのマイコンを植物工場で使用するには, 防水ボックスに設置して使用する必要がある。本システムでは未来工業のウォルボックスを用いた。コントローラ設置後の防水ボックスを図 9 に示す。

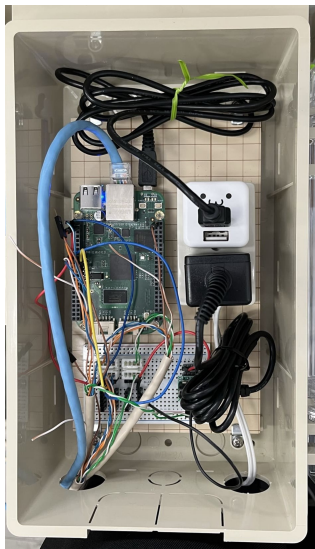


図 9 防水ボックス設置後

図 9 より, BeagleBone Green, 電源タップ, ユニバーサル基板を設置した。電源タップでは BeagleBone Green の電源供給をするための USB ポート, ファン用の 5V の AC アダプタを使用している。ユニバーサル基

板には BeagleBone Green と SHT31 を I<sup>2</sup>C で並列接続するためにピンを追加している。また AC アダプタを接続するための DC ジャックを取り付けている。

計測・アップロードプログラムはセンサそれぞれに対して 1 つのプログラムを Python で作成した。このプログラムでは, センサより温湿度を取得し, VPD を 2.1 節の計算式を用いて算出する。その後, 温湿度と VPD の値を IEEE 1888 データベース [6] にアップロードする。IEEE 1888 データベースではセンサから集められたデータを共有データベースに格納しておき, そのデータを必要とするソフトウェア (アプリケーション) がそこからデータを読み出して利用することが可能である。本システムでは温湿度と VPD をアップロードし, 数値をグラフ化することに使用している。計測・アップロードプログラムは 1 分毎に自動実行される。アップロードされた温湿度と VPD は, Web アプリケーション上でリアルタイムに数値とグラフで確認することができる。また, アップロードされた環境要素のデータは, それぞれの計測されたセンサと温度, 湿度, VPD を区別して確認することができる。

### 3 実験

#### 3.1 予備実験

予備実験として BeagleBone Green 3 台, センサ 9 つで計測する実験を行う。計測結果に個体誤差が生じる可能性があるため, 誤差が許容範囲内であるか確認する予備実験を行った。検証のために 9 つのセンサを並列に並べて温湿度, VPD をそれぞれ計測する。実験の様子を図 10 に示す。実験結果のグラフを図 11, 12 に示す。

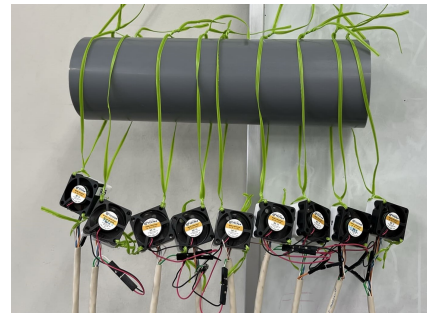


図 10 予備実験



図 11 誤差：温度

データシート [7] によると SHT31 の最大誤差は温度 0.4°C, 湿度 4% となっている。図 11, 12 より, 温度は 0.4°C, 湿度は 2% の間で違いがあり, どちらも誤差の許容範囲に収まっていると言える。また VPD の計測結果を図 13 に示す。

結果として得られた温度, 湿度の誤差から 9 つのセンサでの VPD の誤差は図 13 より, 0.08kPa であると考え

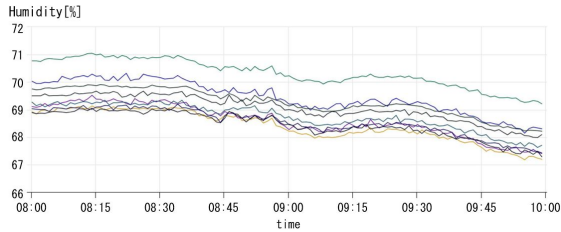


図12 誤差：湿度

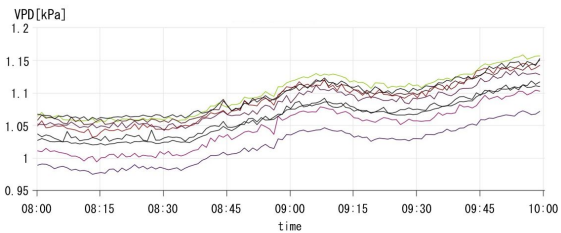


図13 誤差：VPD

る。飛澤らのシステムは校正にも使われている温湿度センサである Vaisala 社製 HMP155 を用いて計測しており、その予備実験では VPD の誤差が 0.1kPa であった [3]。本システムでも同等の誤差が結果として得られたことより、誤差は許容範囲内であると言える。

### 3.2 評価実験

評価実験では BeagleBone Green 3 台、誤差確認したセンサ 9 つで VPD を面計測する実験を行う。今回は学内の人工光型トマト栽培をしている研究室に実験場所を提供して頂き、センサを格子状に配置し面計測を行う。実験は 2023 年 6 月 15 日 19 時～19 時 30 分、天候くもり状態で行う。また、実験部屋の扉や窓は通常時閉め切った状態で実験を行っている。評価実験の様子及びセンサの配置を図 14 に示す。

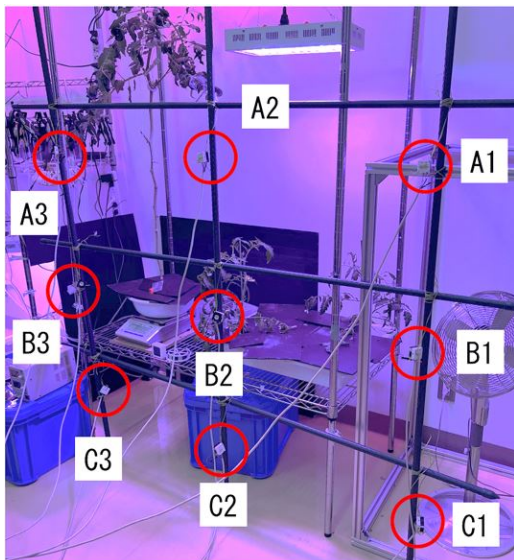


図14 評価実験・センサ配置

図 14 では、上段から下段に A～C、右から左に 1～3 をセンサ名として割り振った。またセンサ間の距離は縦 50cm と横 70cm であり、下段のセンサは地面から 30cm の点で計測を行った。実験結果のグラフを図 15 に示す。

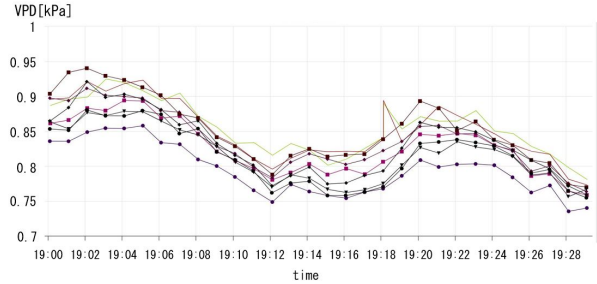


図15 評価実験結果

図 15 より VPD は全てのセンサで 0.07kPa 程の違いで計測された。このことより人工光型栽培では高さで VPD は大きな違いは発生しないと考えられる。今回人工光型栽培で縦に面計測を行うことで提案システムの動作を確認することができた。しかし、群落内と群落間、通路の VPD の偏りを明らかにするためには、実際に太陽光型植物工場での計測が必要となる。

### 4 まとめ

太陽光型植物工場において、植物の光合成速度に影響を与える VPD を制御することで高収量化、高付加価値化を実現する。これまで細霧冷房制御下の植物工場では 1 点や多点での環境計測を行ってきたが、設置されたセンサは全て群落内に設置されているため群落間の正確な VPD 分布が明らかになっていない。本稿ではセンサを群落内と群落間に設置し、VPD を計測、分析できるシステムを提案した。今後の課題は、提案システムを実際に太陽光型植物工場で作動させ、VPD を計測・解析することで環境が変化の原因を明らかにし、生育環境の変化を推定することで植物の状態に合わせて適切に環境制御を行う手法を提案する。

### 謝辞

提案システムの評価実験に協力頂いた本校機械工学科福岡寛先生及び研究室の方々に感謝します。本研究の一部は JSPS 科研費 JP22H02469 基盤研究 (B) 「XR (リアル/バーチャル) 太陽光型植物工場システムの開発」を受けて行なわれた。

### 参考文献

- [1] 古在豊樹, “図解でよくわかる植物工場のきほん”, 誠文堂新光社, 2014.
- [2] 渡邊孝一, 浅野洋介, 栗本育三郎, 糠谷綱希, 狩野敦, 丸尾達, “太陽光型植物工場における連続細霧発生による気温・飽差制御システムの開発”, 計測自動制御学会論文集, Vol.52, No.5, pp.292-298, May 2016.
- [3] 飛澤雄己, 渡邊孝一, 栗本育三郎, 岩田大志, “太陽光型植物工場の水蒸気飽差制御における環境データの多点リアルタイム計測 IoT システムの構築”, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1128-1131, Dec 2018.
- [4] 日本工業規格, “JIS Z 8806:2001 湿度-測定方法”, <https://kikakurui.com/z8/Z8806-2001-01.html>.
- [5] 気象庁, “観測機器について”. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/kuwa/faq/faq11.html>.
- [6] 落合秀也, 江崎治, “スマートグリッド対応 IEEE 1888 プロトコル教科書”, インプレスジャパン, 2012.
- [7] SENSIRION, “Datasheet SHT3x-DIS”, [https://akizukidenshi.com/download/ds/sensirion/SHT31\\_20201119.pdf](https://akizukidenshi.com/download/ds/sensirion/SHT31_20201119.pdf).