

人工気象栽培器における光合成速度および植物重量測定 IoT システムの構築 Construction of the IoT System for Measuring Photosynthetic Rate and Plant Weight in the Artificial Light Type Cultivation

野口 蓮太[†] 白木 厚司[†] 栗本 育三郎[‡]
Renta Noguchi Atsushi Shiraki Ikusaburo Kurimoto

1. 緒言

農作物の安定した供給, 高い品質を得るには, 温度・湿度・光などの環境を適切に管理し, 生産計画通りに栽培を制御する必要がある. そのような環境を実現する手段として, 植物工場が注目されている. 植物工場とは, 屋内の人工的な環境で温度・湿度などを制御しながら作物を生産する施設である. 植物工場で果菜類の収量を増加させるには, 光合成効率を高める必要がある[1].

植物工場は, 太陽光が一切入らず, すべての光を LED などでもかなう人工光型植物工場と, 施設に太陽光を透過させる太陽光型植物工場の 2 種類に大別できる. 特に, 人工光型植物工場は, 栽培室内での実験の再現性の高さや LED の低価格化に伴い, 関心を集めている.

植物工場における現状の課題として, 作物の収量増加や高品質化のための温度・湿度, CO₂ 濃度などの環境制御則について明らかになっていないことが挙げられる. これまで先行研究では, 太陽光型植物工場において, 光合成に寄与するパラメータとして水蒸気飽差 (Vapor Pressure Deficit 以下 VPD と略す) に着目し, 細霧による VPD 制御システムを構築し, 実証実験を行ってきた[2]. しかし, 太陽光型植物工場という大規模なフィールドにおいて, 温度, 湿度, 光, CO₂ 濃度などの環境制御則について明らかにするための実機テストを行うには, 膨大な工数と費用が掛かる. そのため, 実験室内に幅 2.0m, 奥行 2.0m, 高さ 2.8m の人工光型栽培室を構築し, 周囲環境のデータを計測する IoT システムを開発した[3]. 構築したシステムを用いて, 異なる成長度のミニトマトを対象に蒸散速度や水蒸気コンダクタンスについて調べてきた. しかし, 構築した栽培室では, 気温や VPD, CO₂ 濃度の環境を制御することが難しく, 環境制御則について明らかにするための比較実験が容易ではない.

そこで本研究では, 気温, 湿度, 光などの環境条件を適切に設定するための制御側を明らかにすることを目的として, 気温, 湿度, CO₂ 濃度を一定環境に制御可能な人工気象栽培器において, VPD, CO₂ 濃度, 栽培トレイ重量を測定可能な IoT システムを開発する. 本研究により, 過去に構築した人工光型栽培室と人工気象栽培器での異なる環境条件下での栽培およびデータ計測が可能となり, 作物の収量増加や高品質化についての制御則の解明が期待できる.

2. VPD・CO₂ 濃度・植物重量測定 IoT システム

VPD とは, ある温度における飽和水蒸気圧と実際に含まれている水蒸気圧の差のことで, その温度の葉面の潜在的蒸散速度の指標になる. VPD を測定するセンサとして, Vaisala 社製 HMP155 (測定温度範囲:-80~60℃, 湿度範

[†] 千葉大学 Chiba University

[‡] 木更津工業高等専門学校 National Institute of Technology, Kisarazu College

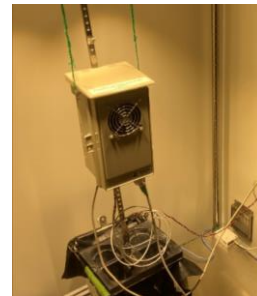


図 1 VPD 測定の様子

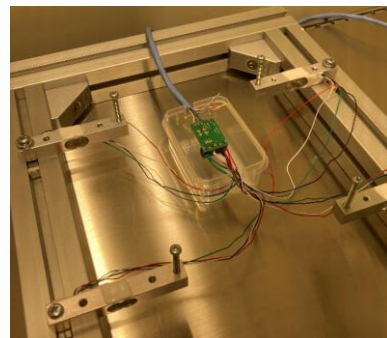


図 2 ロードセル設置の様子

囲:0~100%, 温度誤差:±0.4℃, 湿度誤差:±1.9%, VPD 誤差:±0.05kPa) を使用する. HMP155 は温度, 湿度, を測定し, 湿度が飽和に近い高湿環境においても信頼性の高い計測を行う. また, カバーを取り付けることで LED からの熱を防ぎ, 3m/s 以上の風を内部に送ることで温度, 湿度を測定し, VPD を導出する. VPD を測定している様子を図 1 に示す. VPD の算出式として, Buck の式(1)および式(2)を採用する[4]. ここで, T_d は乾球温度[℃], e_{td} は乾球温度の飽和水蒸気圧[kPa], RH は相対湿度[%], D は VPD[kPa]である.

$$e_{td}(T_d) = 0.61365e^{\frac{17.502T_d}{240.97+T_d}} \quad (1)$$

$$D = e_{td}(T_d) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (2)$$

CO₂ 濃度を測定するセンサとして, SenseAir 社製の K30 (測定範囲:0~5000ppm, 動作温度範囲:0~50℃, 動作湿度範囲:0~95%, 精度:±30ppm±3%rdg) を用いる. HMP155 と同じカバー内に設置し, 植物周囲の CO₂ 濃度を測定する.

植物体および栽培トレイの重量測定に, Sensor and Control 社製のロードセル (型番:SC133-2kg, 定格容量:2kg, 許容過負荷:150%, 動作温度 min:-10℃, 動作温度 max:40℃) を使用する. 栽培トレイの四隅にロードセルを固定し, 栽培トレイを乗せて重量を測定する. 図 2 にロードセルを固定した様子を示す.

VPD 測定 IoT システムでは、RS-485 通信、CO₂ 濃度、重量測定 IoT システムでは、I2C 通信により、センサデータを取得し、データをサーバ上にアップロードする。センサデータ計測のコントローラとして、フタバ企画社製のプログラマブル M2M ゲートウェイを用いる。IEEE1888 という通信規格プロトコルにより、センサ情報を集約的に管理する。

3. 光合成速度の測定方法

本研究では、CO₂ の消費速度から光合成速度を求める。チャンパー（小さな部屋）に植物を入れ、チャンパー内の CO₂ の収支から植物の CO₂ 交換速度を求める方法をチャンパー法という。チャンパーを完全に密閉し、単位時間当たりのチャンパー内の CO₂ 濃度の変化から CO₂ 交換速度を求める方法を特に、閉鎖式チャンパー法と呼ぶ。本研究ではこの閉鎖式チャンパー法を用いる。式(3)に閉鎖式チャンパー法による CO₂ 交換速度の導出を示す。ここで、 P は 1 株あたりの CO₂ 交換速度 [$\mu\text{mol plant}^{-1}\text{s}^{-1}$]、 C_1 、 C_2 は時刻 t_1 、 t_2 におけるチャンパー内の CO₂ 密度 [$\mu\text{mol m}^{-3}$]、 t_1 、 t_2 は時刻 [s] ($t_1 < t_2$)、 V はチャンパーの空気容積 [m^3]、 N は株数 [plant] である。

$$P = V \cdot \frac{C_1 - C_2}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1}{N} \quad (3)$$

本研究で使用する CO₂ 濃度センサの K30 は、ppm を単位として出力するため、式(4)によって CO₂ 濃度から CO₂ 密度へ換算する。ここで、 C_p は CO₂ 密度 [$\mu\text{mol m}^{-3}$]、 C_c は CO₂ 濃度 [$\mu\text{mol mol}^{-1}$] である。

$$C_p = \frac{C_c}{0.0224 \cdot \frac{273 + T_d}{273}} \quad (4)$$

本研究で用いる人工気象栽培器は、空気が循環する構造となっている。CO₂ 濃度をある値に設定すると、CO₂ 濃度が設定値以下になったときに、CO₂ を施用する。設定値より十分高い値まで施用されれば、CO₂ 濃度の調節用通気口を閉じる。その間も空気は循環される。そのため、植物を植える前の状態において、栽培器内の CO₂ 交換速度を導出することで、空気の循環による CO₂ の減少量を求める。次に、植物を栽培した状態で CO₂ 交換速度を導出することで、空気の循環と光合成による CO₂ の減少量を求める。それらの差分を取ることで、光合成による CO₂ の減少量を求める。

4. 実験方法

人工気象栽培器内に IoT システムを設置しデータを測定する。栽培器内の温度、湿度、CO₂ 濃度の設定値はそれぞれ 25°C、75%、1000ppm とする。栽培作物は、糖度が高く品質の良いミニトマトの「千果」とする。30 分間隔で培養液を供給し、余分な廃液を栽培トレイ下の受け皿に捨てる。

5. 結果と考察

2024 年 5 月 30 日 14 時に第一花房がつぼみの時期のミニトマトを 2 株定植した。VPD 測定 IoT システムの記録より、VPD は 0.6~0.9kPa の間で値が変動することを確認した。図 3 に定植した日の CO₂ 濃度と重量測定結果を示す。図 3 から分かるように、CO₂ 濃度は 1000~1200ppm の間で値が変動している。CO₂ の施用により値が上昇し、CO₂ 濃度調製

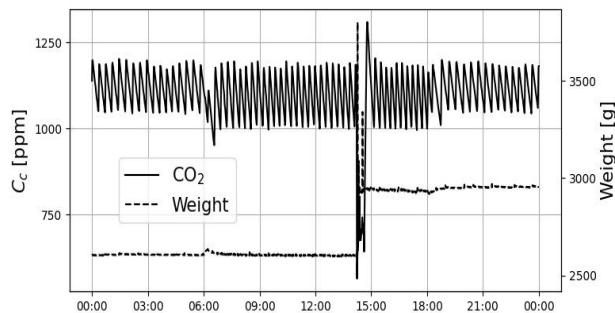


図 3 定植日の CO₂ 濃度と重量の変化

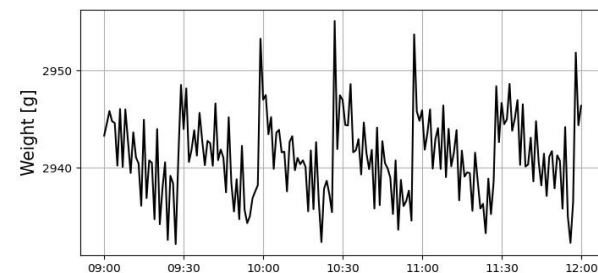


図 4 5 月 31 日における重量の変化

用通気口が閉じられ、空気が循環されることで値が減少していることが確認できる。苗を定植する前の 9 時から 12 時における CO₂ 交換速度は $4.88 \mu\text{mol plant}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、定植日の翌日の同時刻における CO₂ 交換速度は、 $5.71 \mu\text{mol plant}^{-1}\text{s}^{-1}$ であり、その差は $0.83 \mu\text{mol plant}^{-1}\text{s}^{-1}$ であった。定植後の CO₂ 減少量が大きくなっていることから、光合成による CO₂ の吸収が測れていると考えられる。図 4 に定植日の翌日の重量測定結果を示す。培養液の供給により重量が増加し、次の供給まで蒸散により水分が低下することで重量が減少している。細かい値の変動は、温度によるものだと考えられる。正確な蒸散量を推定するには、温度による変動を考慮する必要がある。

6. まとめ

本研究では、気温、湿度、光などの環境条件を適切に設定するための制御側を明らかにすることを目的とし、人工気象栽培器において、VPD、植物重量、CO₂ 濃度測定 IoT システムを構築した。今後、異なる環境・成長度においてデータを計測・分析し、環境制御則について明らかにする。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人、JSPS 科研費 JP22H0249 を受けて行われたことを示すとともに、関係各位に謝意を示す。

参考文献

- [1] 古在 豊樹, “太陽光型植物工場 先進的植物工場のサステナブル・デザイン”, オーム社, (2009).
- [2] 浅野 洋介, 渡邊 孝一, 伊藤 正英, 伊藤 裕一, 栗本 育三郎, “太陽光型植物工場における細霧発生に伴う変動むだ時間を補償する水蒸気飽差制御”, 第 20 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.2345-2350, (2019).
- [3] 野口 蓮太, 佐久間 東陽, 嘉数 祐子, 岩田 大志, 浅野 洋介, 伊藤 裕一, 白木 厚司, 栗本 育三郎, “環境・重量・画像センサーフュージョンによる植物生育過程-蒸散速度・水蒸気コンダクタンスの関係-”, 第 24 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.18-21, (2023).
- [4] LI-COR Inc., LI-610 portable dew point generator instruction manual, (1991).