

## 植物生育過程における蒸散速度と水蒸気コンダクタンスの関係

野口 蓮太<sup>†</sup> 白木 厚司<sup>†</sup> 栗本 育三郎<sup>‡</sup>千葉大学<sup>†</sup> 木更津工業高等専門学校<sup>‡</sup>

## 1. 緒言

高い品質の農作物を安定して供給するためには、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コントロールする必要がある。そのような環境を実現するために植物工場が注目されている。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]。

先行研究では、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、細霧によって VPD を制御するシステムの研究開発と実証を行ってきた[2]。連続細霧発生による気温・飽差制御システムにより、夏季および冬季において植物の果実収量が対象区と比較して 10~20%程度増加した。しかし、異なる地域、気象変動、栽培種や計画、品質目標にシステムを対応させるには、実際のフィールドにおいて実機テストを行う必要があり、膨大な工数と費用が掛かる。植物工場においてシステムを導入する前に、システムによる収量の増加や品質の改善を予測するためには、制御則や植物生理、環境応答、光合成最大化について解明しなければならない。しかし、細霧の発生や蒸散による植物体周辺の VPD の変化、異なる生育段階・周囲環境での植物生理応答はいまだ解明されていない。

そこで本研究では、微気象環境において VPD および植物体と培地養液の供給・蒸散による重さの変化量を測定可能な IoT システムを開発した。また、VPD・重量のデータに葉面積のデータを加え、蒸散速度・水蒸気コンダクタンスを導出した。本研究により、蒸散と植物周囲の環境との関係が明らかになり、植物工場において作物の収量増加や高品質化が期待できる。

## 2. VPD・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 の計測には、Vaisala 社製 HMP155(測定温度範囲:-80~60°C, 湿度範囲:0~100%, 温度誤差:±0.4°C, 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、筒で LED からの熱を防ぎ、3m/s 以上の風をセンサに強制的に送ることで温度・湿度を測定し、VPD を導出する。

植物体および栽培トレイの重量測定に、Valcom 社製のひずみゲージ(零点の温度影響:±0.0125%R.C./10°C, 出力の温度影響:±0.0080%R.C./10°C, 温度補償範囲:-10~40°C(結露, 氷結不可), 許容温度範囲:-30~70°C(結露, 氷結不可))と、同社製のデジタルカラーパネルを用いる。栽培トレイの四隅にひずみゲージを配置して重量測定を行う。

センサデータ計測のコントローラとして、フタバ企画社製プログラマブル M2M ゲートウェイを用いる。IEEE 1888 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。VPD・重量測定 IoT システムでは RS-485 通信により、センサ機器にコマンドを送りデータを取得し、そのデータをサーバ上に送信する。

## 3. 破壊・非破壊検査による葉面積測定

葉面積の測定は、破壊検査と非破壊検査の2種類に分けて行う。破壊検査では、葉を一枚一枚切り離しスキャナで測定する。非破壊では、手振れ補正やタイムラプス機能を備えた GoPro カメラで植物体を撮影し、3D モデルを作成可能なソフトウェアの Agisoft 社製 Metashape を用いる。図 1(a)に破壊検査によって読み込んだ画像データを、図 1(b)に非破壊検査によって構築した 3D モデルを示す。

## 4. 微気象環境における植物体生育モデル

VPD の算出式として、Buck の式(1)を採用する[3]。ここで、 $T_d$ は乾球温度(°C)、 $e_{td}$ は乾球温度の飽和水蒸気圧(kPa)、 $RH$ は相対湿度(%),  $D$ が

Relationship between Transpiration Rate and Vapor Conductance during Plant Growth

<sup>†</sup> Renta Noguchi, Atsushi Shiraki, Chiba University

<sup>‡</sup> Ikusaburo Kurimoto, National Institute of Technology, Kisarazu College



(a) 非破壊検査によって読み込んだ画像データ (b) 構築した 3D モデル

図 1 非破壊・破壊検査による葉面積測定法

VPD (kPa) である.

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

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

式(3)～式(5)に植物体生育数値モデルを示す. ここで,  $E$ は蒸散速度 ( $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ),  $m$ は蒸散による水蒸気の減少量 ( $\text{mol}/\text{s}$ ),  $a$ は葉面積 ( $\text{m}^2$ ),  $C_{vs}$ は葉内部の水蒸気濃度 ( $\text{mol}/\text{mol}$ ),  $C_{va}$ は葉外部の水蒸気濃度 ( $\text{mol}/\text{mol}$ ),  $p_a$ は大気圧 ( $\text{kPa}$ ),  $g_v$ は水蒸気コンダクタンス ( $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ) である. コンダクタンスは気孔に対する気体の出入りのしやすさを示している.

$$E = \frac{m}{a} \quad (3)$$

$$C_{vs} - C_{va} = \frac{D}{p_a} \quad (4)$$

$$g_v = \frac{E}{C_{vs} - C_{va}} \quad (5)$$

## 5. 実験方法

幅 2.0m, 奥行 2.0m, 高さ 2.8m の栽培室を木更津工業高等専門学校地域共同テクノセンター内第 2 ラボラトリにて構築する. 栽培室内は, 空調で室温をコントロールし, 植物体上部に高さ調整可能な LED パネルを設置する. 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. また, 生長度の異なるミニトマトを対象に, 破壊・非破壊検査による葉面積測定を行う. 栽培期間中, VPD・重量の計測を行い, データをサーバ上にアップロードする. 計測後, 計測した葉面積と合わせてそれぞれ蒸散速度および水蒸気コンダクタンスを導出する.

## 6. 結果と考察

葉面積の測定は 2 回に分け, 1 回目は 6 株の第 3, 4 花房開花時期の植物体を, 2 回目は 5 株の第 1, 2 花房開花時期の植物体を対象として行われた. 葉面積測定時における VPD, 蒸散による重さの減少量, 葉面積, 蒸散速度, 水蒸気コンダクタンスを表 1 に示す. 破壊・非破壊検査による葉面積の測定結果を図 2 に示す. 図 2 より, 非破壊検査による葉面積の測定から破壊検査の葉面積

表 1 測定結果と計算結果

	1st	2nd
$D$ (kPa)	1.71	1.55
$m$ (mmol/s)	3.01	1.18
$a$ ( $\text{m}^2$ )	1.38	$6.00 \times 10^{-1}$
$E$ (mmol/ $\text{m}^2\text{s}$ )	2.19	1.98
$g_v$ (mol/ $\text{m}^2\text{s}$ )	$1.29 \times 10^{-1}$	$1.29 \times 10^{-1}$

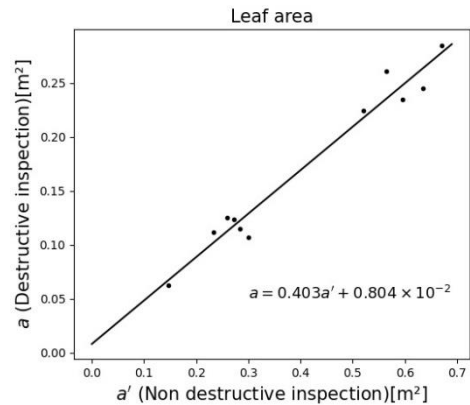


図 2 非破壊・破壊検査による葉面積測定 のグラフ結果

を推定できる可能性が示唆された. 表 1 より, 生長段階が異なることで葉面積や総蒸散量に違いが出るが, 面積当たりの蒸散量や水蒸気コンダクタンスにあまり違いが出ないことが明らかになった. 水蒸気コンダクタンスが同じになったのは, VPD によって気孔の開閉具合を調整しているためだと考えられる.

## 7. 結言

本研究では, 微気象環境において VPD, 重量, 葉面積を測定し, 蒸散速度・水蒸気コンダクタンスを導出した. 本研究の結果により, 生長段階の異なる植物生理特性について明らかになった.

## 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] LI-COR Inc.: LI-610 portable dew point generator instruction manual, (1991).