

## [研究助成 (A)]

## 太陽光型植物工場のための生育状況適応可能な 水蒸気飽差制御システムの開発

Development of Vapor Pressure Deficit Control System Adapting to Growing for Sunlight-type Plant Factory

2231001



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

木更津工業高等専門学校  
電気電子工学科  
木更津工業高等専門学校  
情報工学科

准教授 浅野 洋介  
特命教授 栗本 育三郎

### [研究の目的]

太陽光型植物工場において、高付加価値の果菜類生産が求められている。これまでに、光合成に寄与するパラメータとして水蒸気飽差 (VPD) に着目し、細霧発生によって VPD を直接制御するシステムの研究開発と実証を行ってきた。

本研究の目的は、外乱の多い太陽光型植物工場において、空間 VPD を任意の目標値に収束させ、かつ生育状況に適応可能な制御手法を確立することにある。そうすれば、施設・設備・栽培ステージに応じた光合成の最大化と調整を実現する生育の機序をパラメータとして明らかにすることができ、収量や栄養価を増加・制御することが可能となる。

これまでの研究により、細霧発生時の噴霧圧力を制御可能な気温・飽差制御システムの構築と実証を行い、夏季・冬季ともに 10~20% の収量増加に成功している。また、植物工場のモデル同定を行い、モデルベース制御により VPD の振動抑制・安定化に成功している。しかしながら、植栽や栽培ステージ、施設の要因に影響され、空間 VPD 分布に差異が検出されている。さらに、作物を生育するための最適な VPD は未だに不明であり、現状は栽培者の経験に頼っている。空間 VPD を一定化することができれば、植物のストレス量を定めることができる。

様々なパターンの空間 VPD で植物を生育し、ストレス量と植物生育との関係性を見いだすことができる。例えば、トマトの糖度などにおいて、高ストレス環境を容易に実現できるようになり、収量増加のみならず植物体の品質を制御するための、生物学的な知見が得られる可能性がある。すなわち植物生育に対する空間 VPD 制御手法を確立することで、収量の向上、割れの軽減、糖度や品質の改善調整など、植物工場ごとに特色ある作物の高付加価値を創造できるようになる。

特に、発芽から育苗の時期に適切な VPD 制御を施すことが重要であることがわかってきた。そこで、空間 VPD を一定化する制御手法を開発するとともに、植物のストレス量および生育状況をリアルタイムに把握する必要がある。これらについて、植物を破壊することなく非接触で制御・評価する手法は存在していない。

### [研究の内容, 成果]

#### 1. モデルフリー空間 VPD 制御

##### (1) 細霧発生による水蒸気飽差制御

太陽光型植物工場で発生する粒子径 10~30  $\mu\text{m}$  の細霧により、植物工場内の VPD を制御している。この VPD は乾球温度  $T_d$  および湿球温度  $T_w$  から Sprung と Buck の式を用いて算出されるが、強い非線形性を持っており、制御系

設計に利用するのは難しい。そこで、実測データをもとに、制御対象を入力むだ時間のある1次遅れ系と仮定した。図1にフィードバック制御を構成したブロック線図を示す。ここで、 $C(s)$  は任意のコントローラ、 $D_{ref}(s)$  は目標VPD、 $D_a(s)$  は VPD、 $U(s)$  は制御入力となる細霧噴霧ポンプ用インバータ動作指令周波数、 $L(t)$  は時変むだ時間、 $Q_a(s)$  は日射、植物の蒸散、植物工場の換気などの影響をひとまとめにして、 $U(s)$  に対する外乱相当としたものである。細霧発生のためのインバータとポンプの部分には、非線形の飽和要素  $\text{sat}(\cdot)$  (非負かつ最大値を制限) と時変むだ時間要素  $e^{-L(t)s}$  が存在する。

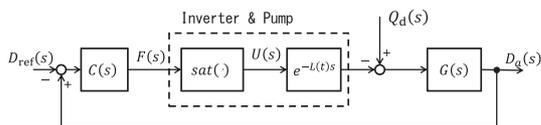


図1 VPD 制御システム

制御対象を用いないモデルフリー制御則の1つである Intelligent PID 制御<sup>[1]</sup> (以下、iPID 制御) をコントローラとして採用する。iPID 制御は PID 制御のようなモデルフリーの制御則であり、ゲイン設計が容易で制御対象のパラメータ変動に強いという特徴がある。

iPID 制御を後述する開発したコントローラに実装するためにはデジタル実装する必要がある。デジタル実装した制御システムを図2に示す。

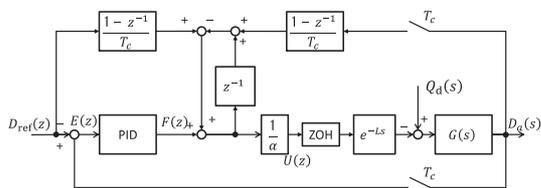


図2 Intelligent PID 制御による VPD 制御

ここで、PID ブロックは PID 制御器であり、比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$ 、微分ゲイン  $K_D$  が設定可能である。 $\alpha$  は iPID 制御における調整パラメータ、ZOH ブロックはゼロ次ホール

ド、 $z^{-1}$  は遅延演算子、 $\frac{1-z^{-1}}{T_c}$  は信号差分計算、 $T_c$  は制御周期である。植物工場では、ハードウェアの制約から、制御周期を十分に短くすることは困難であり、現状では  $T_c=1\text{ s}$  である。

## (2) VPD コントローラの開発

本研究では、様々な植物工場において VPD 制御実験を実施するために、ポータブルコントローラを設計・製作した。図3のように実験システムを構築し、学内外において実験検証ができるようになった。図4および図5は VPD 制御装置および内部構造である。



図3 細霧発生実験の様子



図4 VPD コントローラ (ANTS)



図5 コントローラおよびポンプ制御装置の内部構造

また、効率的に VPD 制御実験をするためにソフトウェアを更新した。これまでは制御パラメータのみを変更する場合であっても、ソフト

ウェアをすべて更新する必要があったため、実験には非常に長い時間を要していた。今回、実験システムを更新したことにより、実験検討の実施サイクルを短くすることができた。

### (3) 植物工場における制御実験結果

図6に、千葉大学環境健康フィールド科学センター内5号棟における太陽光型植物工場でのVPD制御実験結果を示す。今回はiPID制御に

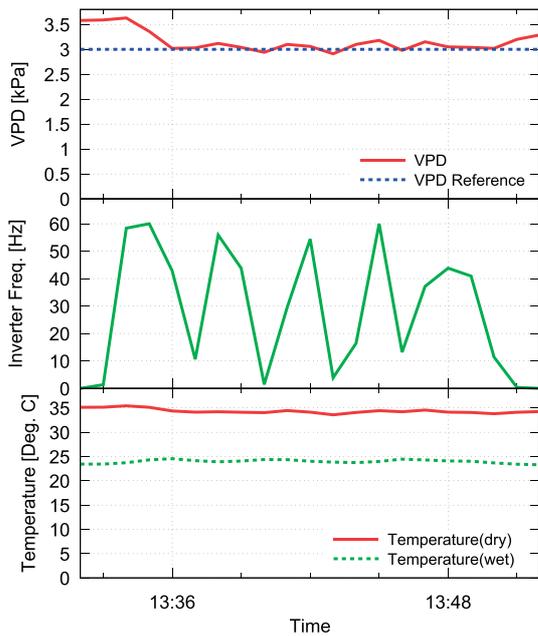


図6 iPID制御によるVPD制御実験結果1

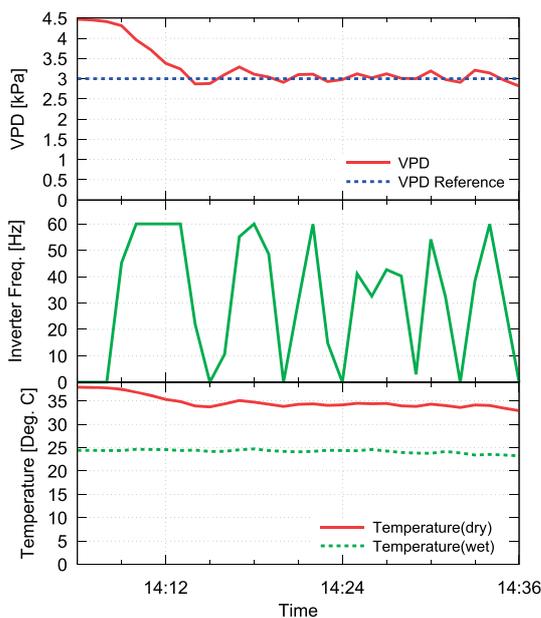


図7 iPID制御によるVPD制御実験結果2

おいて、微分動作を除いたiPI制御を適用し、 $K_p=900, K_i=4.5, \alpha=10$ としたときの実験結果である。時刻13:32からiPI制御が実行され、約5分程度で目標値とほぼ一致していることがわかる。図7は初期VPDが異なった場合の結果となっている。どちらの実験においても十分な性能が発揮できたと考えられる。

## 2. 植物の成長の画像計測（気孔開度推定）

精度よくVPD制御が実施されている環境であれば、葉の気孔の開度を計測することで、蒸散や光合成の状態を推定することができる。そこで、トマト葉の観測画像から気孔開度を推定する手法を提案する。提案する画像処理アルゴリズムは次の3ステップで構成される。

- 1) テンプレートマッチングによる気孔抽出
- 2) 気孔の開口部を楕円状にフィッティング
- 3) 長軸と短軸の比から推定気孔開度  $R$  を算出

他の研究では、開口部の面積を開度としているものもあるが<sup>[2]</sup>、本研究では、気孔自体の大きさは無関係に開度を推定するために相対的な比率を採用した。

気孔の撮影は学内に構築した人工光型植物工場で実施した。図8に植物工場における撮影環境を示す。図9に対象とした葉の全体画像、図10に撮影時の様子を示す。撮影にはAnMo Electronics社製Dino-Lite Edgeの顕微鏡カメラ



図8 学内における人工光型植物工場



図9 気孔を観測するトマト葉 (左：表面, 右：裏面)



図10 気孔観測時の様子

ラを用いた。倍率は800倍程度である。複数回の画像観測の結果から検討したところ、気孔観測の対象とする葉は、これから成長する頂上部の小さいものがよいことがわかった。

撮影した気孔を図11に示す。画像処理による自動化の前に手作業による気孔幅の計測結果を示す。気孔を楕円と仮定したとき、短軸の距離が $3.8\ \mu\text{m}$ 、長軸の距離は $9.5\ \mu\text{m}$ であった。このとき、推定気孔開度は $R = \frac{3.8}{9.5} = 0.40$ と算出された。

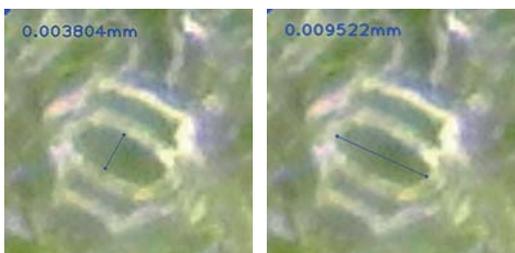


図11 顕微鏡カメラにより観測された気孔

この結果をふまえて、提案画像処理アルゴリズムによる気孔開度推定結果を図12に示す。

図からわかるように、推定気孔開度  $R=0.50$



図12 提案画像処理アルゴリズムによる気孔開度推定結果

と算出され、手作業による計測より推定値は大きくなっている。手作業による計測とは一致しないものの、類似した傾向となっていることがわかる。手作業での計測では、短軸と長軸の判定が明確ではなく、さらに非常に時間がかかるため、誤差があることを考慮して画像処理による気孔開度推定を活用する。

これまでの観察結果から、同一葉内であっても気孔の形状や開度が異なることがわかってきた。様々な形状の気孔開度を推定した結果を図13に示す。

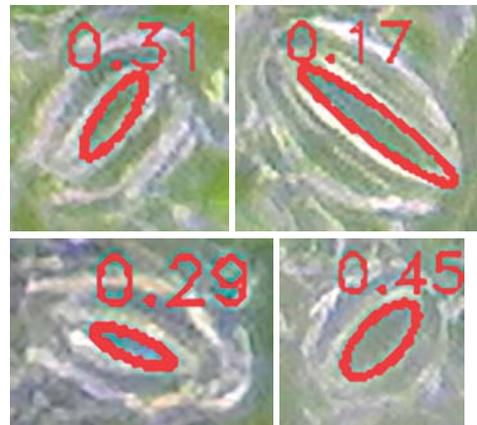


図13 様々な気孔形状における開度推定結果

今回提案しているアルゴリズムを用いることで様々な形状において開口部を検出し、開度推定が可能であることがわかる。

次に、様々な VPD の条件で気孔開度推定した結果を図14に示す。一般的にトマトの生育に適した VPD は  $0.6\sim 1.2\ \text{kPa}$  とされており、図14の結果から、適正範囲外では気孔開度が小さく、図7のような栽培ステージでは  $1.05\ \text{kPa}$  に気孔開度のピークがあることが判明した。

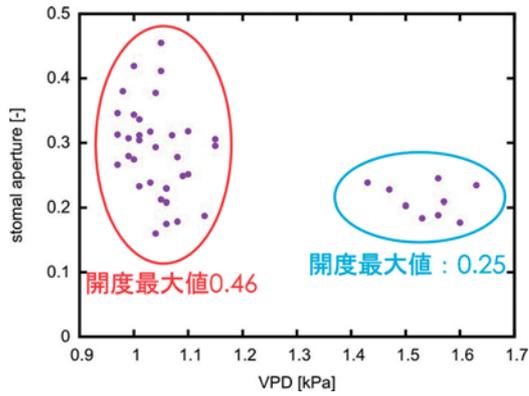


図 14 PD と気孔開度の関係

### 3. まとめと今後の課題

本研究では、制御対象のモデルを必要としない iPID 制御により植物工場における細霧発生による VPD 制御の精度向上を実現することができた。また、顕微鏡カメラによる画像から、気孔開度推定の自動化も実現することができた。今後は実際に植物を生育しながら、異なる季節等における実験を重ね、iPID 制御の有効性を検証するとともに、顕微鏡カメラをロボットアーム等に搭載し、計測作業自体も自動化する。

VPD 目標値の設定を栽培者の経験ではなく、植物自身が決定できるシステムの構築を目指す。

#### [参考文献]

- [1] M. Fliess and C. Join: Intelligent PID controllers, 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 326/331 (2008)
- [2] Momoko Takagi, *et al.*, "Image-Based Quantification of Arabidopsis thaliana Stomatal Aperture from Leaf Images," *Plant and Cell Physiology*, Vol. 64, No. 11, pp. 1301-1310 (2023)

#### [成果の発表, 論文など]

- [1] 浅野洋介, 高原桃矢, 伊藤正英, 栗本育三郎, "画像処理にもとづくトマト葉の非破壊気孔開度推定", 令和 6 年電気学会全国大会, p.72, 2024
- [2] 浅野洋介, 伊藤正英, 野口蓮太, 伊藤裕一, 栗本育三郎, "太陽光型植物工場における Intelligent PID 制御による水蒸気飽差制御の熱流体シミュレータを通じた制御性能の検討", 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.2504-2507, 2023 (優秀講演賞受賞)