解説

太陽光利用型植物工場の知能化のための Speaking Plant Approach 技術

Speaking Plant Approach Technologies for Intelligent Greenhouse

執筆者プロフィール

仁科 弘重
Hiroshige NISHINA

◎1978年3月東京大学農学部農業工学科卒業、
1980年3月東京大学大学院農学系研究科修士課程修了、同年4月東京大学農学部助手、
1985年12月農学博士（東京大学）、1986年3月愛媛大学農学部助教授、1998年4月より現職
◎研究・専門テーマは、太陽光利用型植物工場における環境制御、室内・屋上・壁面の緑化によるグリーンアメニティ
◎愛媛大学教授 農学部、日本生物環境工学会 副会長・教育部会長・生物環境調節部会副部長
(〒790-8566 松山市榑味3-5-7 愛媛大学農学部)
E-mail : nishina@agr.ehime-u.ac.jp

育状態の診断が不可欠である。また、この植物生育診断は生産の場で行うことになるため、破壊計測は不可であり、できれば接触計測も避けたい。

植物生育診断、およびその結果に基づいた環境制御については、Speaking Plant Approach（以下、SPA）という考えが提唱されている。SPAは、物言わぬ植物の生体情報を各種センサで計測し、その情報に基づいて、植物の生育状態・ストレス状態を診断することで、愛媛大学農学部では20年以上前から当時の橋本康教授（現在、名誉教授・日本生物環境工学会名誉会長）が中心となって研究を進めてきた⁽¹⁾。具体的な植物生体情報には、植物のカラー画像（A）、熱画像（葉の温度：B）、茎径（茎の太さ：C）、葉のクロロフィル蛍光画像（D）、光合成速度（E）、蒸散速度（F）などがある。このうちA～Dは非接触で計測が可能であり、また、植物の水分状態（水ストレス）にかかわるものがA、B、C、Fであり、生育状態や光合成機能にかかわるものがA、D、Eである。

太陽光利用型植物工場では、栽培環境、生育状態の変動が不可避であるからこそ、SPAが必要である。また、SPAに利用可能な各種センサも、この10年間くらいで高性能化とともに低価格化が進展したため、生産の場への導入も可能となった。以下では、SPA技術の先端研究の例について述べる。

図1 太陽光利用型植物工場

1. はじめに

植物工場には、大別すると人工光利用型と太陽光利用型がある。人工光利用型のように完全に密閉された室内で人工光だけで植物が栽培されている様子は一般の人にはインパクトを与えるが、太陽光利用型（図1）は、果菜類（トマト、キュウリ、ナス、ピーマン、メロン、イチゴなど）も栽培でき、食料生産に大きく貢献できると考えられる。そこで、筆者らのグループ（愛媛大学植物工場研究プロジェクトチーム）では、太陽光利用型植物工場における収穫量増大を目的として、植物生体情報計測に基づいた太陽光利用型植物工場の知能化のための研究開発を進めている。

2. 太陽光利用型植物工場であるが故の Speaking Plant Approach

太陽光利用型植物工場では、人工光利用型植物工場とは異なり、外界の気象条件の短期的および日々の変動によって、栽培環境が変動するだけではなく、生育状態も変動する。この栽培環境の変動と生育状態の変動は、太陽光を利用している以上不可避であり、この変動に対応して収穫量を維持・増大させることが、太陽光利用型植物工場発展のキーポイントとなる。栽培環境および生育状態の変動による影響を軽減するにはさまざまな環境制御が必要となるが、効果的な環境制御を行うためにも、まず、植物の生

3. 太陽光利用型植物工場における SPA 技術

3.1 萎れによる水ストレス状態の診断

筆者らは、長年にわたり、高付加価値農産物の一つである高糖度トマトの安定生産を目的とした給液制御に関する研究を行ってきた⁽²⁾。高糖度トマトを生産するためには、給液（養液の供給）を制限（低水分管理）し、トマトに適度な水ストレスをかけることが必要であるが、水ストレスが過度になってしまえば、生育障害が発生する。そのため、給液を制限する場合は、植物の水ストレス状態を連続的に計測・推定し、その推定結果によって給液を行うという一連の制御システムが必要となる。

水ストレス状態の計測・推定方法としては、熱画像（葉温）、茎径、蒸散量、萎れなどがある。このうち、萎れは、短時間的な（分単位）環境変動（主に日射量の変動）の影響を受けにくいという長所がある。植物は、萎れると葉に張りがなくなり、葉は垂れ下がってくる。この現象を利用するために、トマトの個体または群落のカラー画像を撮影し、そのカラー画像中の緑色のピクセル数（三次元的に考えれば、植物の投影面積）を求めることによって、萎れを定量化している⁽³⁾。筆者らは、約6年前から、この考え方に基づいた給液制御システムの開発研究を行っている。また、カラー画像を群落の上から撮影した方が萎れの早期診断が可能となることが明らかになったため⁽⁴⁾、現在は、デジタルカメラは群落の上部に設置している。図2は、群落上から撮影された8株の植物体の投影面積の3日間の変化を示す。たとえば、③（1月9日12時）では弱い水ストレス状態であったが、⑤（1月10日12時）では強い水ストレス状態になり、この時点で給液を行ったところ、その日の夜（⑥）には萎れはほとんど回復した。

また、投影面積がどこまで低下したら給液するかの設定値を変えることによって、トマトにかける水ストレスの程度も調節が可能である。水ストレスをかけると、果実の糖度は上昇するが、果実重量および収穫量は減少することが一般的である。したがって、生産者にとって、どの程度の糖度でどの程度の重量の果実を作るかが、市場のニーズとも関連して重要となるが、この給液制御システムでは、設定値を変更することによって、生産者が希望する糖度と重量の組合せを達成することができる。

3.2 クロロフィル蛍光による光合成機能の診断

植物は光合成色素で吸収した光エネルギーを用いて光合成を行うが、吸収したすべての光エネルギーを光合成に利用できるわけではない。光合成に使われなかった余剰な光エネルギーは、熱として捨てられる（熱放散）か、吸収した光よりも波長の長い光として再発光される。この再発光された光が、クロロフィル蛍光である。そのため、クロロフィル蛍光を正確に計測することによって、光合成反応に関する情報を非破壊かつ非接触で得ることができる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。クロロフィル蛍光は683nm付近にピークをもつ赤色光であるため、実際のクロロフィル蛍光画像計測装置は、励起光照射用のLEDパネル光源（現在は、青色光を使用）とロングパスフィルタを装着したCCDカメラから構成される⁽⁷⁾。

図2 萎れによる水ストレス状態の診断

図3 クロロフィル蛍光による光合成機能の診断

筆者らは、クロロフィル蛍光計測法の一つであるインダクション法を用いたクロロフィル蛍光画像計測を行い、トマト群落の光合成機能診断を行っている。クロロフィル蛍光は、図3の(a)のように、励起光照射開始後、その蛍光強度が時間的に変化する（ $I \rightarrow D \rightarrow P \rightarrow S \rightarrow M \rightarrow T$ ）。この変化のパターンがそのときの光合成機能の状態によって変わることを利用して、光合成機能を診断することができる。電子伝達障害や強光ストレスを受けた場合の変化パターンも、図中に示してある。現在、変化のパターンを特徴づけるさまざまな指標を検討している。図3の(b)は、 $P/ave (S:M)$ （Pの値を、SからMまでの平均値で割った値）という指標を求め、植物工場内の平面分布を表したものである。この測定時には植物工場の一部で暖房をOFFにしていたが、 $P/ave (S:M)$ の分布を見ると、夜間気温の差による光合成機能の違いをクロロフィル蛍光によって認識できていることがわかる。

3.3 葉温による蒸散機能の診断

葉温は、基本的には、その瞬間の吸収日射量、葉面と空気との顕熱伝達量、蒸散による潜熱伝達量、葉面と周囲物体との長波放射交換量の収支によって決定される。このうち、蒸散による潜熱伝達量は周辺空気の湿度と気孔抵抗によって影響を受けるが、気孔抵抗は、植物の蒸散機能が低下してくると大きくなる。したがって、日射量、気温、湿度と葉温を測定すれば、蒸散機能が低下している植物体を判別できる。次式は、その瞬間の日射量（ $X_1: \text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ）、気温（ $X_2: ^\circ\text{C}$ ）、飽差（ $X_3: \text{mmHg}$ ）から、正常な蒸散を行っている植物の葉温（ $Y: ^\circ\text{C}$ ）を推定する式（実験式）である。

$$Y = 13.04X_1 + 1.016X_2 - 0.0355X_3 - 3.2 \quad (R^2 = 0.98)$$

筆者らが開発した「自走式植物生育診断情報収集装置」の葉温センサによって、葉温の分布（マップ）を作成でき

図4 自走式植物生育診断情報収集装置

るが、測定した葉温が高い部分の植物体は、蒸散機能が低下している可能性が考えられる。

3.4 植物生育診断情報および収穫物情報のマッピングシステム

筆者らは、栽培環境、植物生育診断、生産物（収穫量、糖度など）の情報の平面分布を収集するために、自走式植物生育診断情報収集装置（図4）と収穫物情報収集装置を開発し、マッピングシステムも開発した⁽⁸⁾。自走式植物生育診断情報収集装置には、クロロフィル蛍光画像計測装置、葉温計測システム、三次元画像計測装置が搭載されており、また、温室内の位置情報を把握しながら、事前に入力されたプログラムに応じて自律走行できる装置である。クロロフィル蛍光画像計測装置は、励起光照射用のLEDパネル光源、ロングパスフィルタを装着したCCDカメラ、計測対象部位の高さに合わせて画像計測部を昇降させる駆動部などから構成されている。葉温計測システムは、放射温度センサと距離センサの組み合わせが、高さ方向に4点かつ両側に取り付けられており、同時に8点の葉温が計測できる。なお、距離センサは、放射温度センサが葉以外の物体の温度を計測しないようにするための判断に用いられている。三次元画像計測装置は、約40cm離れた位置に取り付けられた2台のCCDカメラであり、二つの二次元画像からコンピュータ上で三次元画像を作成する。収穫物情報収集装置は、果実の糖度、酸度、大きさ、形状などを計測できる。

これらによって、栽培環境、生育診断、収穫物の情報のマップ（平面分布）を得ることができる。これらのマップのデータを解析し、新たな知見やモデルを導出することによって、知識ベースを充実させることができる。

4 SPA技術と知識ベースによる植物工場の知能化

植物生育診断結果に基づいてどのような環境制御を行う

図5 SPA技術と知識ベースによる植物工場の知能化

かを判断するのに必要なのが、さまざまな知識、データ、ノウハウが蓄積されている「知識ベース」である。言い換えれば、SPAと知識ベースを組み合わせることによって、生育状態の変動に対応した収穫量増大、品質向上が可能となる。筆者らは、このことを、「植物工場の知能化」、「知的植物工場」と呼んでいる（図5）。さらに、植物生育診断や環境制御の情報は蓄積され続けるため、これらデータから新たな関係性、生育モデルなどを抽出、作成・構築できる。すなわち、知識ベースは充実、進化し続けることができ、この知識ベースの充実、進化までも含めて、筆者らは「植物工場の知能化」と考えている⁽⁹⁾。

現在、筆者らは、各種SPA技術の開発・向上と、植物生育モデルの構築など知識ベースの充実に取り組んでいる。植物工場普及拡大の国家プロジェクトによって、愛媛大学が経済産業省、農林水産省両省から植物工場研究開発拠点に採択されたことも含めて、わが国の先端技術を取り込むことによる植物工場の発展に努力している。

（原稿受付 2010年5月25日）

●文 献

- (1) Hashimoto, Y., Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature, *Acta Horticulturae*, **106** (1980), 139-146.
- (2) Nishina, H., Nagatomo, K., Yamamoto, S. and Hashimoto, Y., Irrigation control by means of laser sensor measuring stem diameter of tomato plants in nutrient solution cultivation system with granular rockwool, *Proc. XIV Memorial CIGR World Congress 2000*, (2000-11-12), 1787-1790.
- (3) 仁科弘重・山下佳奈・羽藤堅治, 高糖度トマト生産のための養液栽培における横から見たトマトの投影面積による給液制御指標の検討, 農業環境工学関連4学会2004年合同大会講演要旨集, (2004-9), 57.
- (4) 高山弘太郎・仁科弘重・山本展寛・羽藤堅治・有馬誠一, デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレス早期診断, *植物環境工学*, **21-2** (2009), 59-64.
- (5) Omasa, K., Shimazaki, K., Aiga, I., Larcher, W. and Onoe M., Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves, *Plant Physiol.* **84** (1987), 748-752.
- (6) 高山弘太郎・仁科弘重・大政謙次（同編者）, 施設園芸・植物工場におけるイメージセンシング, 農業・環境分野における先端的画像情報利用—ファイトイメージングからリモートセンシングまで—, (2007), 21-34, 農業電化協会.
- (7) 高山弘太郎・仁科弘重, 施設園芸における植物診断のためのクロロフィル蛍光画像計測, *植物環境工学*, **20-3** (2008), 143-151.
- (8) 有馬誠一, 知的植物工場における情報収集ロボットの開発, 日本生物環境工学会2008年大会講演要旨, (2008-9), 333-336.
- (9) 仁科弘重, 地域拠点型「知的太陽光植物工場」の進展, 日本学術会議農学委員会・食料科学委員会合同農業情報システム学分科会主催公開シンポジウム「知的太陽光植物工場」講演要旨, (2009-9).