

### 6-5

# 植物工場におけるセンシング

愛媛大学農学部 高山 弘太郎、東京大学大学院農学生命科学研究科 大政 謙次

## 太陽光利用型植物工場の環境制御戦略としてのスピーキング・プラント・アプローチ

生産者の高齢化などにより、わが国の農業就業人口は減少の一途を辿り、トマトなどの代表的な果菜類であっても出荷量が軒並み低下している。これを下支えし、将来に向け、持続的かつ安定的に食料を生産するシステムとして植物工場が注目されている。太陽光利用型植物工場は、太陽光エネルギーを最大限に活用して大規模な食料生産を行う施設であり、気温・湿度・二酸化炭素濃度・光強度などのさまざまな環境要因を制御するための設備を有している。ただし、環境条件が時々刻々と変化する太陽光利用型植物工場において4定(定時・定量・定質・定価格)の食料生産を実現するには、環境情報だけでなく、植物生体情報をも高度に利用した環境制御戦略が必須である。

このような太陽光利用型植物工場における環境制御コンセプトとして、スピーキング・プラント・アプローチ(SPA)コンセプトが注目されている<sup>1)</sup>。SPAコンセプトは、さまざまなセンサを用いて植物の生体情報を計測し、生育状態を診断し、それに基づいて生育環境を適切に制御するというものである<sup>2)</sup>。このSPA環境制御を実現する上でカギを握る技術が植物生体情報計測技術である。なお、SPA環境制御における「適切に制御された生育環境」とは、必ずしも植物の生育にとって最適な環境のみを指すわけではない。たとえば、植物体に適度なストレスを付与することで高付加価値農産物を生産する場合、適度なストレス状態を維持するた

めにもSPAは有効である<sup>1)</sup>。

## 植物生体情報の画像計測

画像計測技術は、非破壊かつ非接触にて対象物の情報を得ることができるため、太陽光利用型植物工場における植物生体情報計測技術としてきわめて有効である。画像計測の最大の特徴は、ある1点の平均値のみを取得するスポット計測とは対照的に、広い領域の同時計測が可能であるという点である。なお、画像を構成している1画素単位での詳細な解析も可能であり、対象物との距離やレンズ系を変えることで、細胞から群落までのあらゆるレベルでの生体情報計測が可能である。太陽光利用型植物工場において利用が期待される画像計測技術としては、デジタルカラー画像計測、熱赤外画像計測、分光反射画像計測、クロロフィル蛍光画像計測などが挙げられる。これらに用いられる画像計測デバイスの性能と価格はすでに栽培現場に導入可能なレベルに達していると考えられる。

## デジタルカラー画像計測による水ストレス診断

市販のデジタルカメラ(数千円～)を用いることで、安価であっても100万画素以上の十分な空間分解能を持つ画像計測システムの構築が可能である。デジタルカラー画像計測を利用した生体情報計測例として、直上部から撮影したトマト個体のデジタルカラー画像を用いて「しおれ(水ストレス)」を数値評価する技術<sup>5)</sup>が挙げられる(図1)。この技術を利用したSPA環境制御の例

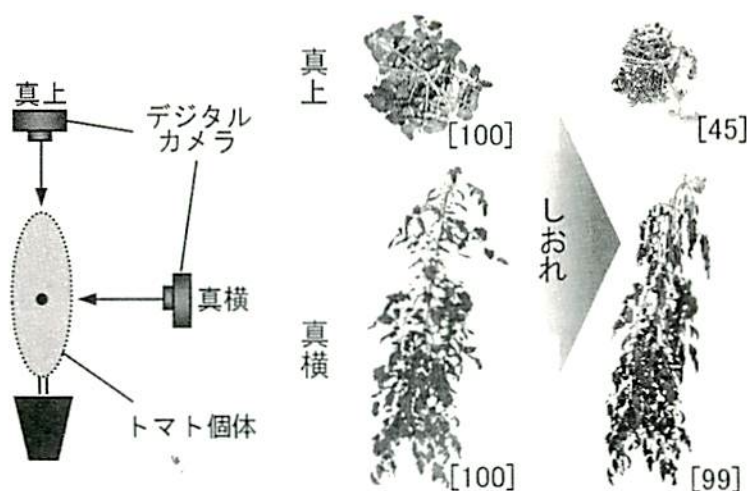


図1 しおれによるトマト個体の投影面積変化  
 [ ] 内の数値は、しおれ前の投影面積を100としたときの相対値

が、「高糖度トマト生産のための水ストレス付与機能つき自動給液システム」<sup>6)</sup>である。高糖度トマトとは、糖度8Brix%以上のトマトのことであり、今後もさらなる消費拡大が期待される高付加価値農産物の1つである。一般に、篤農家の目視による低水分管理によって、植物体に適度な水ストレスをかけ、断続的にわずかなしおれを生じさせながら栽培することにより生産される。大規模な植物工場において、高糖度トマトを安定的かつ大量に生産するためには、篤農家の目に代わる水ストレス診断システムとそれに基づいて給液を管理する自動給液システムが必要となる。デジタルカラー画像を用いたしおれの数値評価技術により、高糖度トマト生産のための自動給液制御が可能となった。

### 熱赤外画像計測による蒸散機能診断

サーモグラフィを用いて、植物体の表面温度の画像計測を行う。葉面の温度(葉温)は、葉に入射するエネルギーと葉から外界へと放出されるエネルギーのバランスによって決まるため、環境条件が一定の場合、蒸散速度が大きいと葉温は低くなり、蒸散速度が小さいと葉温は高くなる<sup>1)</sup>。つまり、群落の葉温画像計測することで、群落の蒸散機能のモニタリングが可能となる(図2左:しおれ個体では、気孔閉鎖により蒸散速度が低下しているため、葉温が高い)。最近では、最小検知温度差0.2℃以下(at 30℃)といった高い温度分解能を持

つサーモグラフィが50万円以下で市販されており、海外(オランダ)では太陽光利用型植物工場の栽培現場への導入事例も見受けられる(図2右)。

### クロロフィル蛍光画像計測による光合成機能診断

#### 1. クロロフィル蛍光とその画像計測

植物はクロロフィルにより光エネルギーを吸収し、そのエネルギーを使って空気中の二酸化炭素から糖を合成する。この反応が光合成であり、植物のさまざまな生体反応のなかで最も重要な反応である。ただし、クロロフィルが吸収した光エネルギーのすべてが光合成に利用されるわけではない。光合成に使われずに余ったエネルギーの一部は、赤色光として捨てられる。この赤色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で、植物体に触れることなく光合成機能に関する生体情報を取得することができる<sup>7)</sup>。クロロフィル蛍光の画像計測に必要な光学系はきわめてシンプルである。青色LED等を用いて植物葉に青色光を照射(励起光)すると、植物葉は励起光の反射光と光照射により励起されたクロロフィル蛍光を発する。CCDカメラの前部に赤色フィルタ(ロングパスフィルタ)等を配置して青色の反射光成分を除去することで、クロロフィル蛍光画像の撮像が可能となる<sup>8)</sup>。



図2 葉温画像によるトマト個体の蒸散機能モニタリングの例(左)と太陽光利用型植物工場内に設置されたサーモグラフィ(右:オランダ)

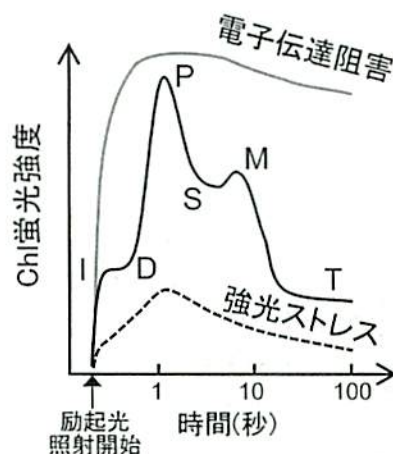


図3 インダクションカーブの模式図

## 2. 「インダクション法」による光合成機能診断

夜間などの暗条件におかれた植物葉に一定の強さの励起光を照射すると、クロロフィル蛍光強度が経時的に変化する現象が確認される。この現象はインダクション現象とよばれ、このときの蛍光強度の変化を表す曲線をインダクションカーブとよぶ(図3:黒色実線)。インダクションカーブの形状は、葉の光合成能力の高低や種々のストレスの影響を受けて変化(図3:灰色実線と破線)するため、インダクションカーブの形状を解析することで光合成機能の診断が可能となる。なお、励起光の照射開始から1~5秒後に確認される最大蛍光強度(P)や5~20秒後に確認される蛍光強度(SおよびM)の比等が光合成機能指標として有効であることがわかっている<sup>9)</sup>。

## 3. トマト群落の健康状態モニタリングのためのクロロフィル蛍光画像計測システム

図4は、植物工場内で栽培されているトマト群落を対象とした光合成機能診断を行うために作製したクロロフィル蛍光画像計測システムの模式図(AおよびB)と植物工場内での計測の様子(C:右下は成長点付近の蛍光画像)である。本システムは、励起光照射用の60cm×60cmの大型LEDパネル光源( $\lambda < 650\text{nm}$ )とロングパスフィルタ( $\lambda > 700\text{nm}$ )を装着したCCDカメラからなるクロロフィル蛍光画像計測部、トマト群落の高さに合わせて画像計測部を昇降させる駆動部、計測した蛍光画像を解析して植物診断を行う解析・診断部(PC)、および、これらを搭載して植物工場内の通路を移動するための走行部(カート)で構成されている。

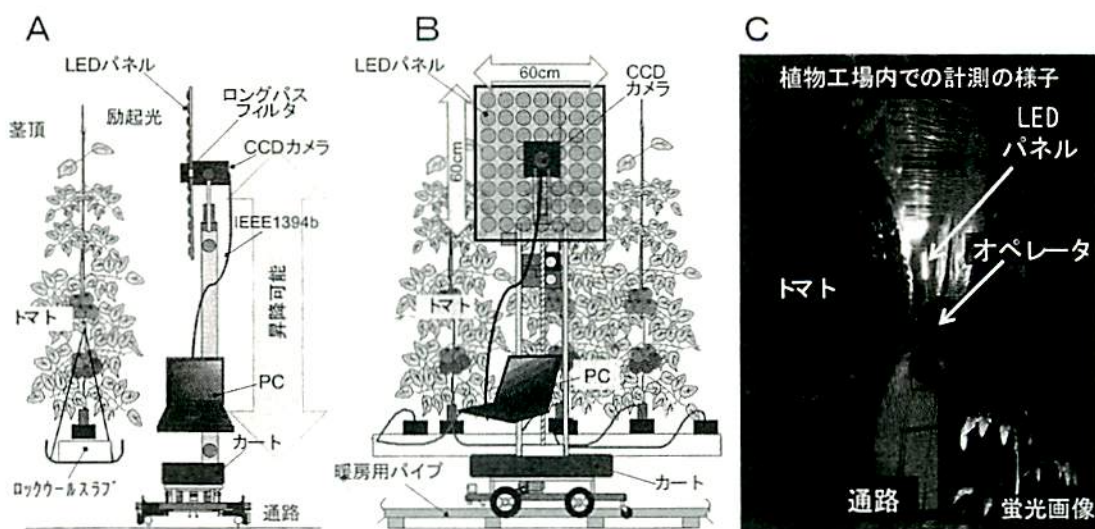


図4 植物工場内のトマト群落を対象としたChl 蛍光画像計測システムの模式図  
A: 側面、B: 正面と植物工場内の画像計測の様子、C: 右下は成長点付近の蛍光画像

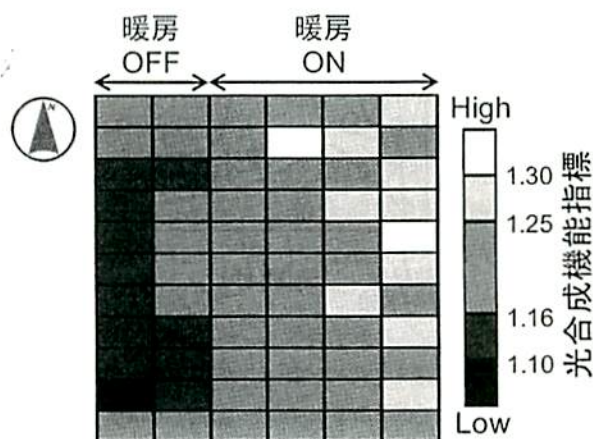


図5 植物工場内の光合成機能マップ

#### 4. 太陽光利用型知的植物工場における光合成機能診断の事例

##### (1) 夜間気温の違いが光合成機能に及ぼす影響の検知

図5は、2009年1月に計測された愛媛大学太陽光利用型知的植物工場内の光合成機能指標(=蛍光強度P/S~Mの平均蛍光強度)マップである。このとき、20m×20mの栽培領域において約1,000株のトマトが栽培されていたが、等間隔となるように66株を選出して計測対象とした。この計測を行う前の約1か月間、植物工場西側(図5のマップの左側)では夜間暖房を行っておらず、

この間の夜間平均気温は8~10℃であり、これは、夜間暖房を行った東側(図5のマップの右側)よりも2~4℃低かった。図5における光合成機能指標の偏在(東側が高く、西側が低い)は、夜間気温の違いにより生じた光合成機能の差異を検知したものと考えられる。

##### (2) トマトサビダニ害の早期検知

トマトサビダニ(*Aculops lycopersici* (Masse))は、施設栽培では1年中発生する害虫である。一部の株で発生した後、急速に拡大するが、農業に対する感受性が高いため、発生初期にスポット的に少量の農薬を散布



図6 トマト群落を対象とした個葉レベルでのトマトサビダニ害の検知

することで比較的容易に防除できる。図6は、2009年8月に太陽光利用型知的植物工場が発生したトマトサビダニ害を発生初期の段階で検知した例である。このような病害の早期検知が可能になれば、早期の処置により被害を最小限に抑えられるだけでなく、農業使用量の低減にも寄与する。

## 画像計測の今後の展望

本稿で詳しく紹介したクロロフィル蛍光画像計測による光合成機能診断システムは、自律走行型ロボットに搭載され、植物生育診断装置(井関農機㈱)として商品化された。また、デジタルカラー画像計測や熱赤外画像計測についても、画像計測デバイスの性能と価格はすでに栽培現場に導入可能なレベルに達していると思われる。普及のための課題は、栽培現場において有用な「使える生体情報」を提供できるか否かである。なお、作物群落が複雑な立体構造を持つために測定対象部位毎に環境条件が大きく異なる可能性があるが、このような測定対象の不安定性を考慮しながら、有意な生体情報を安定して取得可能なシンプルな計測・解析方法の確立は不可欠である。さらに、一連の計測と解析の結果として得られる生体情報の精度、空間分解能および時間分解能が現場ニーズと適合するように最適化する必要がある。

## 【参考文献】

- 1) 橋本康ら：太陽光植物工場の新展開，養賢堂，pp.32-70, 2012.
- 2) Takakura T : Transactions of the ASAE, 17: 1150-1154, 1974.
- 3) Udink ten Cate A J, et al. : Acta Horticulturae, 87: 265-272, 1978.
- 4) Hashimoto Y : Acta Horticulturae, 106: 139-146, 1980.
- 5) 高山弘太郎ら：植物環境工学 (J.SHITA), 21 (2): 59-64, 2009.
- 6) 仁科弘重ら：特願 2006-138761.
- 7) Omasa K, et al. : Plant Physiology, 84: 748-752, 1987.
- 8) 高山弘太郎, 仁科弘重：植物環境工学, 20 (3): 143-151, 2008.
- 9) 高山弘太郎ら：特願 2010 - 250098 (国際出願番号 2011JP006197).